



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
ENERGY INSTITUTE

# ANALÝZA TEPLITNÍHO POLE KONTEJNERU PRO POUŽITÉ PALIVO

TITLE

## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

TOMÁŠ ŠVARÍČEK

## VEDOUcí PRÁCE

SUPERVISOR

ING. HUGO ŠEN

BRNO 2009

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok:2008/09

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

student: Švaříček Tomáš

který studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

### **Analýza teplotního pole kontejneru pro použité palivo**

v anglickém jazyce:

### **Temperature field analysis of spent fuel cask**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Řešení teplotních polí složeného tělesa s objemovými zdroji tepla. Ukázat cesty k řešení problému, formulovat potřebné zjednodušující předpoklady řešení, sestavit výpočtové rovnice a okrajové podmínky. Získat analytické řešení a numerické řešení v systému ANSYS a porovnat oba přístupy.

Cíle bakalářské práce:

- 1)seznámit se s podmínkami skladování paliva v kontejnerích pro použité jaderné palivo (geometrie, materiály, vývin zbytkového tepla v palivu),
- 2) vyhledat rovnice přenosu tepla a okrajové podmínky,
- 3) navrhnout potřebná zjednodušení, sestavit na základě přijatých předpokladů výpočtový model,
- 4) provést zjednodušené analytické řešení teplot vybraných míst,
- 5) zabývat se vytvořením zjednodušeného modelu pomocí MKP v systému ANSYS a provést výpočet,
- 6) souhrn a porovnání získaných výsledků teplotních polí, závěry.

Seznam odborné literatury:

- 1) Jícha, M. - Přenos tepla a látky, Skripta VUT v Brně, 2001
- 2) Heřmanský, B. - Termomechanika jaderných reaktorů, Academia, Praha, 1986
- 3) ANSYS Help - online dokumentace k programu ANSYS 11
- 3) Internet

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Hugo Šen

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2008/09.

V Brně, dne 15.11.2008

## Anotace

Cílem této bakalářské práce je řešení teplotního pole ve stěně skladovacího kontejneru použitého jaderného paliva určeného pro suchý mezisklad. Také ukázat možné cesty k řešení problému výpočtu teplotního pole, společně s formulací potřebných zjednodušujících předpokladů pro řešení v prvním přiblížení a sestavení okrajových podmínek výpočtu. Na základě přijatelných parametrů byl sestaven výpočtový model, získáno analytické řešení problému a v závěru pak porovnání přístupu s numerickým řešením v systému ANSYS.

## Annotation

The purpose of this thesis is temperature field analysis of spent fuel cask destined for dry buffer storage. Also to show possible ways of solving the difficulties in temperature field analysis, together with definition of simplifying presumptions and boundary conditions. Based on reasonable arguments were designed solving formulas, gained analytic solution of the temperature field and then compare analytical solution with numeric solution from ANSYS in the end of thesis.

## Klíčová slova

Vyhořelé palivo, kontejner, přenos tepla, vnější a vnitřní stěna

## Key words

Spent fuel, container, heat transfer, outward and inward surface

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

ŠVAŘÍČEK, T. *Analýza teplotního pole kontejneru pro použité palivo*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 60 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Hugo Šen.

## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci vypracoval samostatně na základě uvedené odborné literatury pod vedením Ing. Hugo Šena.

V Brně dne 20. května 2009

.....  
Tomáš Švaříček

## Poděkování

*Rád bych poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce p. Ing. Hugovi Šenovi za jeho trpělivé vedení práce, množství praktických rad a cenných informací*

## Obsah

Seznam použitých symbolů	8
1 Úvod	9
2 Použité jaderné palivo	10
2.1 Přepřacování	10
2.2 Uložení	11
2.2.1 Základní způsoby meziskladování vyhořelého paliva	11
2.2.2 Hlubinné uložení	14
3 Kontejnery pro skladování použitého jaderného paliva v suchých meziskladech	15
3.1 Podmínky skladování paliva v kontejnerech	15
3.2 Vybrané typy skladovacích kontejnerů	16
4 Teoretické základy problematiky	26
4.1 Přenos tepla z kontejneru do okolního prostředí	26
4.1.1 Fourierova diferenciální rovnice nestacionárního vedení tepla v prostoru	26
4.1.2 Fourierova diferenciální rovnice ustáleného vedení tepla	27
4.1.3 Okrajové podmínky	28
4.1.4 Kriteriační rovnice pro odhad součinitele přestupu tepla na stěně kontejneru	30
4.1.5 Odvození vztahu pro výpočet teploty ve stěně válce v závislosti na velikosti poloměru ( $r$ )	33
5 Volba modelové situace (kontejner, materiál, zbytkový výkon)	35
6 Analytický výpočtový model	36
6.1 Zjednodušující předpoklady pro výpočet	36
6.2 Formulace okrajových podmínek analytického výpočtového modelu	37
6.3 Výpočet teploty ve stěně kontejneru pro vybrané podmínky	41
7 Výpočtový model v systému ANSYS	43
7.1 Analýza teplotního pole ve stěně kontejneru na použité jaderné palivo	43
7.2 Jednotlivé varianty výpočtu	46
8 Závěr	54
9 Seznam obrázků a tabulek	56
10 Seznam použité literatury	58
11 Příloha	60



**Seznam použitých symbolů:**

Značka	Význam	Jednotka
$\rho$	Hustota stěny kontejneru	$[\text{kg m}^{-3}]$
$c$	Měrná tepelná kapacita stěny kontejneru	$[\text{J kg}^{-1}\text{K}^{-1}]$
$T$	Teplota	$[\text{K}]$
$T_{\text{in}}$	Teplota vnitřní stěny kontejneru	$[\text{°C}]$
$T_{\text{out}}$	Teplota povrchu kontejneru	$[\text{°C}]$
$T_{\infty}$	Teplota okolí kontejneru	$[\text{°C}]$
$T_f$	Střední (určující) teplota	$[\text{°C}]$
$D_{\text{in}}$	Vnitřní průměr kontejneru	$[\text{m}]$
$D_{\text{out}}$	Vnější průměr kontejneru	$[\text{m}]$
$r$	Poloměr	$[\text{m}]$
$R_{\text{in}}$	Vnitřní poloměr kontejneru	$[\text{m}]$
$R_{\text{out}}$	Vnější poloměr kontejneru	$[\text{m}]$
$\tau$	Čas	$[\text{s}]$
$\lambda$	Součinitel tepelné vodivosti stěny kontejneru	$[\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}]$
$\lambda_v$	Součinitel tepelné vodivosti vzduchu při $T_f$	$[\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}]$
$q_v$	Měrný tepelný výkon zdroje	$[\text{W m}^{-3}]$
$x, y, z$	Prostorové souřadnice	$[\text{m}]$
$q$	Měrný tepelný tok	$[\text{Wm}^{-2}]$
$q_{\text{out}}$	Měrný tepelný tok na povrchu kontejneru	$[\text{Wm}^{-2}]$
$Q$	Tepelný tok	$[\text{W}]$
$S$	Plocha přestupu tepla	$[\text{m}^2]$
$Nu$	Nusseltovo číslo	$[-]$
$\alpha$	Součinitel přestupu tepla	$[\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}]$
$\alpha_v$	Součinitel přestupu tepla víka	$[\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}]$
$\alpha_s$	Součinitel přestupu tepla stěny	$[\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}]$
$\alpha_D$	Součinitel přestupu tepla podstavy	$[\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}]$
$L$	Výška kontejneru	$[\text{m}]$
$Ra$	Rayleighovo číslo	$[-]$
$g$	Tíhové zrychlení	$[\text{ms}^{-2}]$
$\beta$	Součinitel objemové roztažnosti plynů	$[\text{K}^{-1}]$
$\nu$	Kinematická viskozita vzduchu při jeho střední teplotě	$[\text{m}^2\text{s}^{-1}]$
$Pr$	Prandtlovo číslo	$[-]$
$Gr$	Grashofovo číslo	$[-]$
$P$	Zbytkový výkon vyhořelých kazet	$[\text{W}]$

## 1. Úvod

Jaderná energie je nepostradatelnou součástí našeho života a v současnosti je nejperspektivnější způsob zajištění energetických potřeb lidstva. I přes často značně negativní postoj k jaderné energetice a velmi zdoluhavý a legislativně náročný postup k výstavbě jaderné elektrárny, se k únoru 2009 ve světě vyskytuje 439 jaderných reaktorů, které jsou v provozu a slouží ke komerční výrobě elektřiny a přibližně dalších 50 reaktorů je ve výstavbě.<sup>[1]</sup>

Z hlediska vlivu na životní prostředí patří jaderné elektrárny mezi velmi šetrné zdroje výroby elektrické energie. Jejich provoz je velmi šetrný vůči poškozování životního prostředí, nevznikají skleníkové plyny, nespotřebovává se kyslík a neobnovitelné suroviny (ropa, uhlí). Jedním z omezujících parametrů jsou radioaktivní odpady a jejich skladování.

V jaderné energetice vzniká celá řada radioaktivních odpadů, od nízkoaktivních (například kontaminované obaly, ochranné oděvy, atd.) přes středně aktivní odpady, až po vysoceaktivní odpady, které tvoří zejména vyhořelé palivo.

Vyhořelé palivo obsahuje značné množství radioaktivních prvků a také uvolňuje značné množství tepla do okolí. Z těchto důvodů musí být palivo úplně izolováno od biosféry a to po celou dobu, po kterou může pro člověka, nebo životní prostředí představovat riziko.

Způsob izolace od okolního prostředí se může, v různých elektrárnách, v různých zemích a v různém časovém období lišit. Avšak vždy se pro izolaci paliva použije nějaký typ skladovacího kontejneru.

Skladovací kontejnery jsou kovové schránky vyrobené z materiálů s dobrými těsníci, stíníci a mechanickými vlastnostmi, které pohlcují velkou část radioaktivity a odvádí teplo produkované palivem do okolí. A právě výpočet průběhu teplotního pole ve stěně kontejneru je hlavním cílem této práce.

Úvodní kapitoly práce se zaměřují na vyhořelé palivo, způsoby s jeho nakládáním a základními principy skladování, včetně meziskladování mokrou a suchou metodou. V další části je ukázáno skladování paliva v suchých meziskladech, podmínky pro skladování a přehled několika typů kontejnerů. V další kapitole pak popis matematického aparátu pro výpočet teplotního pole pomocí Fourierovy diferenciální rovnice vedení tepla, včetně teorie okrajových podmínek a teorie odhadu součinitele přestupu tepla na vnější stěně kontejneru. Dále se zabývá volbou modelové situace, jako definování jednotlivých parametrů kontejneru, volbě materiálu a velikosti zbytkového výkonu paliva.

Poté se práce zabývá výpočtovým modelem, včetně definování zjednodušujících parametrů, odhadu součinitele přestupu tepla a výpočtu teplot na vnitřní a vnější stěně kontejneru. V závěrečné části jsou uvedeny výsledky z numerického řešení teplotního pole v programu ANSYS a porovnány s analytickým výpočtem z předchozí části práce.

## 2. Použité jaderné palivo

Ještě předtím, než se stane z palivových článků tzv. použité jaderné palivo, je z nich uvolněno značné množství energie (přibližně  $3,6 \cdot 10^{11}$  MJ při použití paliva na 4-letý cyklus).<sup>[2]</sup>

Jakmile jaderné palivo dosáhne požadovaného stupně vyhoření, musí být z reaktoru vyjmuto a nahrazeno palivem čerstvým. Na použité jaderné palivo pak lze principiálně nahlížet ze dvou hledisek:

- Palivo je považováno za cennou surovinu, které bude dále využito (viz. Přepřacování).
- Palivo je pokládáno za odpad a podle toho s ním bude i nakládáno (viz. Uložení):

### 2.1 Přepřacování

Vyhořelé palivo lze přepřacovat v přepřacovatelském závodě, což znamená oddělit z něj ještě použitelný uran a plutonium a zbylé vysoce aktivní odpady převést do formy vhodné k definitivnímu uložení.

Tento způsob je avšak velmi složitý a nákladný chemicko-fyzikální proces, proto se využívá pouze v omezené míře a v ekonomicky vyspělých státech. Například v USA je proces přepřacování zakázán z obavy zneužití štěpitelných materiálů teroristickými nebo vojenskými organizacemi.

Princip přepřacování je znám již z první poloviny 20. století a i když tímto chemickým procesem 1 tuna přepřacovaného jaderného paliva ušetří 2 tuny přírodního uranu,<sup>[2]</sup> tak je stále ekonomicky výhodnější využít uran z přírodních nalezišť. Hlavním důvodem pro přepřacování je menší spotřeba přírodních zdrojů uranu, ale také menší množství vyhořelého paliva k uskladnění (z jedné tuny vyhořelého paliva po přepřacování zůstane, kromě středně aktivního odpadu, přibližně 115 litrů vysoceaktivního odpadu, které se převede pomocí vitrifikace do formy skla.)<sup>[2]</sup>

Technologií pro přepřacování použitého jaderného paliva disponují např. Japonsko, Francie, Německo, Španělsko, Rusko a Velká Británie.

## 2.2 Uložení

Použité jaderné palivo lehkovodních reaktorů je při výměně přesunuto pod vodou do bazénu použitého paliva. Účelem skladování použitého paliva bezprostředně po vyjmutí z jaderného reaktoru je snížení jeho aktivity a odvod zbytkového tepla (bezpečné dochlazování), které je uvolňováno rozpadem štěpných produktů. Produkované množství tepla postupně klesá, po snížení výkonu tepla pod určitou mez, což trvá přibližně 3 až 5 let, putuje palivo nejčastěji do meziskladu vyhořelého paliva, který je obvykle situován mimo stavební část primárního okruhu jaderné elektrárny. V meziskladu může být palivo skladováno po dobu několika desítek let, aniž by bylo potřeba s kontejnery manipulovat.

Tato strategie má velkou výhodu v tom, že dojde na několik desítek let k odložení konečného rozhodnutí jak dále s palivem naložit. Dává to časový prostor vědcům nejen zdokonalit dosavadní uznávané systémy, ale i přinést zcela nové technologie, jak pro skutečně trvalé uložení paliva, tak pro dočasné uložení s ponecháním možnosti budoucího využití například pomocí transmutace v transmutačních jaderných reaktorech.

### 2.2.1 Základní způsoby meziskladování vyhořelého paliva

V současné době se ve světě pro skladování použitého jaderného paliva používají dva technologické postupy meziskladování, které se liší v zásadě pouze zvoleným chladícím médiem.

- Suchá metoda
- Mokrá metoda (bazény)

#### *Suchá metoda:*

Použité jaderné palivo je skladováno ve speciálních pouzdrech – tzv. kontejnerech. K odvádění zbytkového tepla, které odpad produkuje slouží okolní vzduch, který vlivem přirozeného proudění ochlazuje povrch kontejneru. Vývoji a výrobě kontejnerů musí být věnována velká péče, protože samy o sobě musí omezit únik ionizujícího záření vycházejícího z paliva na akceptovatelnou úroveň a zároveň musí zajišťovat dobrý odvod tepla do okolního prostředí. Tyto kontejnery se většinou vyrábí z materiálů s vynikajícími těsníci, stínícími a mechanickými vlastnostmi ze speciálních ocelí a litin.

Kontejnery bývají buď umístěny samostatně na otevřené ploše (USA), nebo v krytých halách z lehké ocelové konstrukce (ČR, Německo), nebo se kontejnery zabetonovávají do železobetonových jímek (USA).



*(Obr.1: Suchý mezisklad v Ahausu –Německo )*

Rozlišují se 2 způsoby suchého skladování:

- Horizontální skladování
- Vertikální skladování

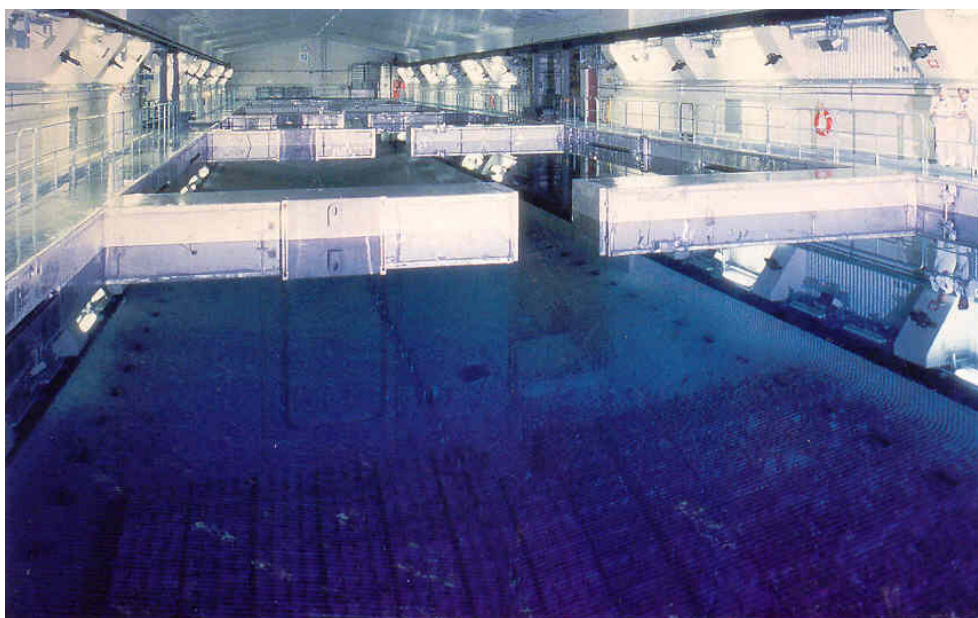
Základní dělení kontejnerů:

- Kovové skladovací kontejnery
- Kovové dvojúčelové kontejnery – ( blíže uvedeno v kapitole 4)

***Mokrá metoda:***

Mokrý způsob je v dnešní době nejrozšířenější metoda skladování vyhořelého paliva z jaderných elektráren. <sup>[2]</sup> Jako chladicího média se využívá obyčejné demineralizované vody a palivové soubory jsou skladovány ve speciálních pouzdrech potopených v hlubokých skladovacích bazénech, které jsou opatřeny vrstvou z nerezavějící oceli. K rozvinutí mokré metody skladování vedly dlouholeté zkušenosti se skladováním odpadu v bazénech použitého paliva. Demineralizovaná voda zajišťuje spolehlivý odvod tepla a natolik dobrou ochranu před zářením, že personál se může podél bazénu bez obav pohybovat. Výhodou této metody je tedy lepší chladicí účinek oproti vzduchu a snadná vizuální kontrola obalu odpadu. Nevýhodou je vysoká technická náročnost skladu. Vybudování a provoz této metody je ekonomicky náročnější oproti suché metodě. Musí se dbát na vysokou kvalitu těsnosti skladovacích bazénů a také na dostatečně zabezpečenou filtraci vody v bazénu, která přichází do kontaktu s ochlazovanými soubory s vyhořelým palivem.

Této metody se využívá například ve Švédsku, Francii, Velké Británii, Rusku a také na Slovensku.



*(Obr.2: Centrální mokrý podzemní mezisklad CLAB – Švédsko)*

### 2.2.2 Hlubinné uložení

V současné době není nikde na světě definitivně vyřešeno trvalé nakládání s vyhořelým palivem. Avšak v zemích využívajících jadernou energetiku panuje obecné přesvědčení, že nejbezpečnějším způsobem konečného uložení, bude umístěný vyhořelého paliva do úložišť vybudovaných v hlubinných geologických formacích.

V současné době ve většině zemí probíhá výběr vhodné lokality pro úložiště, nebo výzkumné práce již na vybrané lokalitě.<sup>[3]</sup> Poloha úložiště je velmi pečlivě vybírána, v úvahu připadají pouze stabilní a neporušené geologické formace, které jsou stabilní již po dlouhou dobu. V prostředí, které neumožňuje pohyb vody, která jsou bezpečná z pohledu pohybu litosférických desek či vulkanické činnosti. Místa, kde se nevyskytují naleziště uhlovodíků, nebo využitelných minerálů, aby se vyloučila pozdější možnost ovlivnění okolí úložiště člověkem. Vhodné lokality pro úložiště se především jeví různé druhy granitů, jílovité materiály, břidlice, vulkanické tufy a solné formace.

Lokality, které by se v budoucnu mohly například stát místem hlubinného úložiště jsou Mol (Belgie), Äspö (Švédsko), Grimsel a Mont Terri (Švýcarsko), důl Asse (Německo), Whiteshell (Kanada) a Yucca Mountain (USA).

Yucca mountain je pohoří nacházející se v Nevadské poušti, které je tvořeno převážně tufitickým podložím (popelová fáze vulkanismu), které disponuje velmi nízkou propustností. Úložiště, které je zde v současné době ve výstavbě, má již několikaletý skluz a ani není jisté, zda bude někdy vůbec otevřeno, protože vláda amerického prezidenta Baracka Obamy v březnu 2009 oznámila, že nepočítá s využitím této lokality pro skladování paliva a zamítla skoro všechny další rozpočty spojené s touto lokalitou.<sup>[4]</sup>

### 3. Kontejnery pro skladování použitého jaderného paliva v suchých meziskladech

#### 3.1 Podmínky skladování paliva v kontejnerech

Vzhledem k tomu, že látka skladovaná v kontejnerech je vyhořelé palivo, které má vysokou radioaktivitu a vývin zbytkového tepla, jsou na skladovací kontejnery kladeny vysoké nároky z hlediska jaderné bezpečnosti, aby po celou dobu jejich životnosti, při působení různých vlivů, ať už atmosférických, deformačních, nebo chemických, v žádném případě nedošlo k porušení těsnosti kontejneru a úniku radioaktivních látek do životního prostředí.

Z důvodu nepřetržité kontroly těsnosti, se vnitřní obsah kontejneru vyplňuje inertním plynem o nižším tlaku než je atmosférický. Používá se například Hélium, které díky svým termofyzikálním vlastnostem napomáhá také lepšímu odvodu tepla.

Podmínky pro odvod tepla v kontejneru musí být vytvořeny takové, aby nemohlo dojít ke zvýšení teploty pokrytí palivových elementů natolik, aby došlo ke snížení mechanických vlastností materiálu pokrytí a případné ztrátě těsnosti, nebo dokonce rozsáhlému poškození pokrytí. Vzhledem k tomu, že uvnitř palivového proutku je poměrně vysoký přetlak plyných produktů štěpení, nesmí proto teplota zirkoniových slitin přesáhnout teplotu okolo 350°C. Nad tyto teploty vykazuje snížení hodnot mechanických vlastností (tzv. tečení).

Kontejnery se před skladováním důkladně vysušují, aby vlivem působení vody nedošlo ke korozi vnitřní stěny kontejneru.

Uvnitř kontejneru bývá vyhořelé palivo uloženo do (schránky) tzv. koše, který slouží k zajištění přesně definované polohy kazet a zabránění jejich vzájemnému pohybu. Také slouží k vytváření podmínek pro dobrý odvod tepla a zajištění jaderné bezpečnosti ve smyslu „Atomového zákona“, nebo-li aby efektivní součinitel násobení soustavy štěpitelných materiálů byl za všech okolností nižší než číslo 1.



### 3.2 Vybrané typy skladovacích kontejnerů

#### Kontejner Castor 440/84

- je dvojúčelový obalový soubor (soubor, který slouží pro skladování i transport vyhořelého paliva), dodáván německou společností GNS Nukem, schopný dlouhodobě bezpečně skladovat vyhořelé jaderné palivo.



(Obr. 3: Castor 440/84)

Castor 440/84 se skládá z tlustostěnného tělesa ze speciální tvárné litiny uzavřeného systémem primárního nerezového a sekundárního nerezového víka a při skladování ještě doplněných krycím třetím víkem z uhlíkaté oceli. Vnitřní povrch kontejneru je opatřen niklovou vrstvou pro lepší ochranu proti korozi a vnější pak epoxidovým, snadno dekontaminovatelným nátěrem. Dno je opatřeno hliníkovou vrstvou proti oděru. Uvnitř Castoru se nachází koš z bórové nerezavějící oceli pro 84 palivových kazet s hliníkovými vložkami, který zabezpečuje jejich rozmístění a zároveň rozvádí zbytkové teplo ke stěně obalového souboru. Vnitřní prostor kontejneru je vyplněn héliem o nižším tlaku než je atmosférický.

Těsnícím systémem Castoru jsou primární a sekundární víko, které tvoří dvě nezávislé těsnící bariéry přišroubované k základnímu tělesu Castor, které jsou utěsněné kovovým těsněním Cefilac.

Každé z vík kontejneru je přišroubováno pomocí 48 šroubů dotažených velmi vysokým momentem (1200-1500Nm). Pro manipulaci je Castor vybaven dvojicí dolních a horních čepů, pomocí kterých může být zdvižným zařízením přesouván.

Těsnost kontejneru je neustále monitorována měřením tlaku v prostoru mezi primárním a sekundárním víkem, kde je tento prostor naplněn inertním plynem (héliem) o přetlaku 0,6 MPa..

**Tabulka č.[1]: Základní technické údaje OS Castor 440/84**

<b>Veličina</b>	<b>Hodnota</b>
hmotnost prázdného OS	94 700 kg
hmotnost OS zaplněného palivem	116 300 kg
počet uskladněných kazet VVER 440	84 ks
výška kontejneru	4080 mm
průměr kontejneru	2660 mm
max. teplota povrchu OS	85 °C
minimální životnost OS	40 roků
hmotnost primárního víka	7400 kg
hmotnost sekundárního víka	3650 kg

## Kontejner Castor 440/84M

Provedení kontejnerů je téměř shodné s kontejnerem Castor 440/84. Drobné rozdíly jsou v konstrukci z důvodu použití kontejnerů na vyhořelé palivo o větším obohacení a tedy i větším tepelným a radiačním účinkům. Kontejner Castor 440/84M má oproti svému předchůdci zesílené biologické stínění (polyetylén) a konstrukčně a materiálově upravené provedení vnitřního koše kontejneru (bórovaný hliník). Zlepšená je zde těsnost kontejneru, kde je navíc kromě kovového těsnění pod každé víko přidáno ještě elastomerové těsnění. Kontejner má průměr stejný jako Castor 440/84, ale je nepatrně vyšší (4,2m). Hmotnost prázdného kontejneru je 93,7t a plného pak 112t. Teplota pokrytí povlaku palivového elementu nepřekročí 350°C.



(Obr. 4: Castor 440/84M)

### **Kontejner CASTOR HAW 20/28 CG:**

- tvárná litina s kuličkovým grafitem GGG40
- parametry kontejneru: délka: 5.933m, průměr: 2,480m, váha: 112tun
- design: GNS
- vyrobeno pro Německo



*(Obr. 5: Castor HAW 20/28 CG)*

### **Kontejner CASTOR THTR/AVR**

- tvárná litina s kuličkovým grafitem GGG40



*(Obr. 6: Castor THTR/AVR)*



### Kontejner CASTOR V/21

- tvárná litina s kuličkovým grafitem GGG40
- design: GNS
- vyrobeno pro U.S.A.



*(Obr. 7: Castor V/21)*



*(Obr. 8: Koš Castoru V/21)*

### Kontejner CASTOR GNS 16

- těleso vyplněno olovem
- design: GNS
- vyrobeno pro Nizozemsko



*(Obr. 9: Těleso Castoru GNS 16)*

### Kontejner VTUK

- pro transport paliva mezi dvěma bloky s reaktorem RBMK 1500
- délka 12 metrů
- vyrobeno pro Litvu



*(Obr. 10: Transport kontejneru VTUK)*

### Kontejner CONSTOR RBMK 1500

- železobetonová konstrukce
- design: GNS
- vyrobeno pro Litvu



*(Obr. 11: Constor RBMK 1500)*



*(Obr. 12: Transport Constoru RBMK 1500)*



**Kontejner TC1**

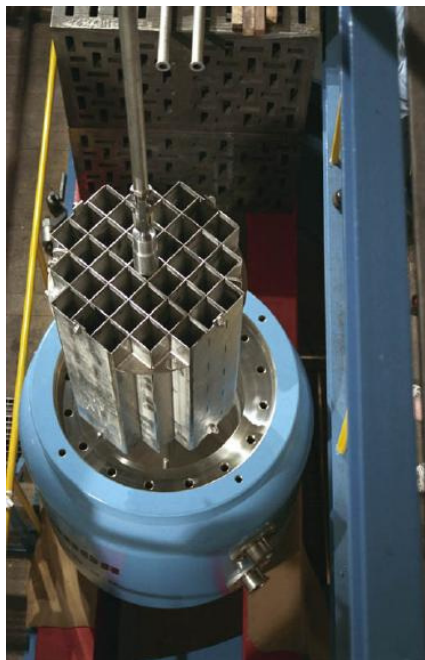
- vyroben pro experimentální projekt Megapie
- pro transport ozářeného terče se ztuhlou taveninou olova a vizmutu do skladu jaderných materiálů
- vyrobeno pro Paul Scherrer Institute, Švýcarsko
- parametry kontejneru: délka: 6m, průměr: 1,1m, váha: 40tun



(Obr. 13: Kontejner TC1)

**Kontejner VPVR/M**

- pro transport paliva z výzkumných reaktorů
- design: Škoda JS
- vyrobeno pro ČR a IAEA (International Atomic Energy Agency)



(Obr. 14: Manipulace s košem kontejneru VPVR/M)



### Kontejner K1 x IRTM

- transportní kontejner pro palivo z výzkumného reaktoru
- design: Škoda JS
- vyrobeno pro ČR



*(Obr. 15: Kontejner K1 x IRTM)*



*(Obr. 16: Pohled na víko Kontejneru K1 x IRTM )*

**Kontejner BOX-TYPE**

- těleso vyrobené z litiny o tloušťce stěny 150mm a objemu 2 až 3,5 m<sup>3</sup> odpadu
- slouží pro skladování vysušených koncentrátů a aktivních materiálů



(Obr.17: Kontejner BOX-TYPE)

**Kontejner MOSAIK**

- těleso vyrobené z litiny, ve stěnách vyplněné olovem



(Obr. 18: Manipulace s kontejnerem MOSAIK)

## 4. Teoretické základy problematiky

### 4.1 Přenos tepla z kontejneru do okolního prostředí

Matematický aparát pro výpočet teplotního pole

#### 4.1.1 Fourierova diferenciální rovnice pro nestacionární děj vedení tepla v prostoru

Teplotní pole v pevných látkách lze analyticky popsat pomocí Fourierovy diferenciální rovnice vedení tepla. Analytickým řešením FDRVT je funkční předpis, který každému bodu řešené oblasti jednoznačně určuje teplotu.

Fourierova diferenciální rovnice vedení tepla [5] pro nestacionární děj s vnitřními objemovými zdroji tepla je parciální diferenciální rovnice druhého řádu

$$\frac{\partial(\rho c T)}{\partial \tau} = \operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T) + q_v \quad (1)$$

Pokud součinitel tepelné vodivosti nezávisí na poloze (materiál tělesa je izotropní), lze jej vytknout a s pomocí Laplaceova operátoru lze rovnici přepsat do tvaru

$$\frac{\partial(\rho c T)}{\partial \tau} = \lambda \nabla^2 T + q_v \quad (2)$$

Ve speciálních případech, kdy teplotní pole nezávisí na čase (je v čase neproměnné) a nejsou-li přítomny objemové zdroje tepla, pak platí

$$0 = \lambda \nabla^2 T \quad (3)$$

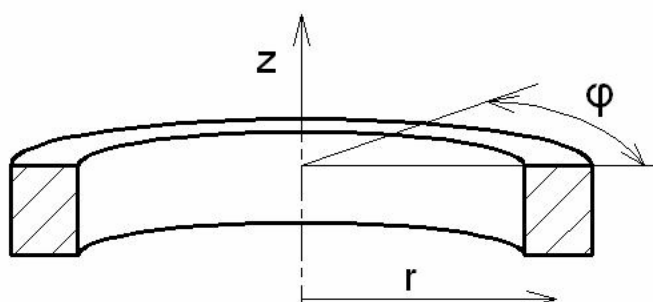
Laplaceův operátor se liší podle typu souřadnic.

- V kartézském souřadném systému pro trojrozměrný prostor má tvar

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

- Pro cylindrický válcový systém má tvar

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (4)$$



(Obr. 19: Označení souřadnic cylindrického systému)

#### 4.1.2 Fourierova diferenciální rovnice ustáleného vedení tepla

Vzhledem k tomu, že výpočet teplotního pole je zaměřen na válcový kontejner, bude pro další odvozování a výpočty využit cylindrický souřadný systém, který je pro válcovou geometrii nejvhodnější.

Fourierova diferenciální rovnice ustáleného vedení tepla ve válcové stěně se zanedbaným axiálním vedením tepla a bez tepelných zdrojů pro cylindrický souřadný systém má tvar

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left( r \frac{dT}{dr} \right) = 0 \quad (5)$$

Integrováním rovnice vznikne předpis

$$T(r) = C_1 \ln(r) + C_2 \quad (6)$$

Podle Fourierova zákona vedení tepla je měrný tepelný tok  $q$  ( $\text{W/m}^2$ ), přenášený vedením v nějaké látce je přímo úměrný velikosti teplotního gradientu a má opačné znaménko než tento gradient: Měrný tepelný tok  $q$  je tepelný tok  $Q$  vztažený na jednotku plochy  $S$ .

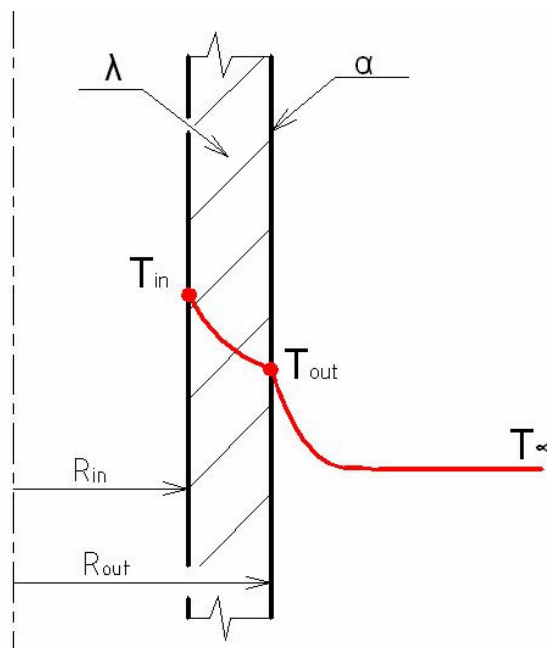
$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{S} = -\lambda \text{ grad}T \quad (7)$$

nebo též pomocí operátoru nabla

$$\dot{q} = -\lambda \nabla T \quad (8)$$

### 4.1.3 Okrajové podmínky

V řešení Fourierovy diferenciální rovnice pro ustálené vedení tepla (dále jen FDRV) vystupují integrační konstanty, které lze vyloučit z okrajových podmínek.



(Obr. 20: Průběh teploty ve stěně s označením parametrů )

V praxi se nejčastěji využívá těchto podmínek:

- Okrajová podmínka I. druhu (Dirichletova):  
Na povrchu tělesa se udržuje dané rozložení teplot  $T_{out}$ :

$$T(R_{out}) = T_{out} \quad (9)$$

- Okrajová podmínka II. druhu (Neumannova):  
Předepisuje známou hodnotu tepelného toku  $q = f(r)$  na souřadnicích o poloměru  $R_{in}$

$$-\lambda \left( \frac{\partial T}{\partial r} \right) \bigg|_{r=R_{in}} = \dot{q} \quad (10)$$

- Okrajová podmínka III. druhu (Fourierova):  
Tepelný tok na povrchu tělesa o poloměru  $R_{out}$  je roven tepelnému toku konvekcí:

$$-\lambda \left( \frac{\partial T}{\partial r} \right) \bigg|_{r=R_{out}} = \alpha (T_{out} - T_{\infty}) \quad (11)$$

#### 4.1.4 Kriteriační rovnice pro odhad součinitele přestupu tepla na stěně kontejneru

Součinitel přestupu tepla se získá z Nusseltova čísla:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot L}{\lambda_v} \quad (12)$$

Nusseltovo číslo se určuje z kriteriační rovnice, jejíž tvar je pro případ vertikální stěny o výšce  $L$  podle <sup>[6]</sup> následující:

$$\overline{Nu}_L = \left\{ \frac{0,825 + 0,387 \cdot Ra_L^{1/6}}{[1 + (0,492 / Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2, \quad (13)$$

kde určující teplota je

$$T_f = \frac{1}{2} \cdot (T_{out} + T_{\infty}) \quad (14)$$

Vztah pro výpočet Nusseltova čísla (13) platí za předpokladu, že je splněna podmínka

$$\frac{d}{L} \geq \frac{35}{Gr_L^{1/4}} \quad (15)$$

Rayleighovo číslo se zjistí podle <sup>[7]</sup> ze vztahu:

$$Ra = Pr \cdot \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot L^3}{\nu^2} . \quad (16)$$

Kde pro případ ideálního plynu, lze uvažovat

$$\beta = \frac{1}{T_f} \quad (17)$$

**Výpočet teploty vnější stěny kontejneru  $T_{out}$ :**

Výpočet teploty  $T_{out}$  vychází z Newtonova vztahu pro tepelný tok konvekcí, nebo-li:

$$\dot{Q} = S \cdot \alpha \cdot \Delta T , \quad (18)$$

$$\dot{Q} = S \cdot \alpha \cdot (T_{out} - T_{\infty}) , \quad (19)$$

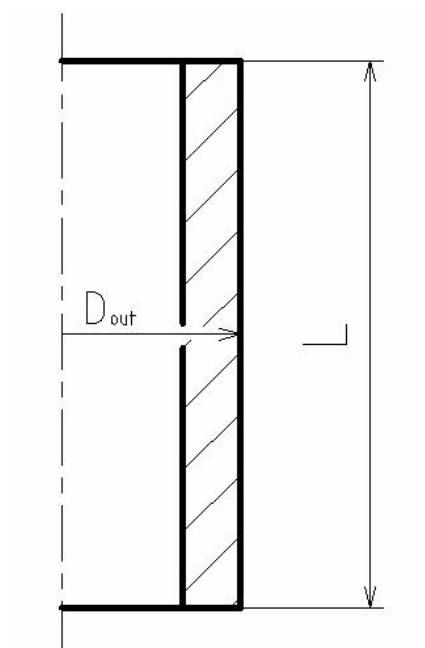
vyjádřením teploty  $T_{out}$  se rovnice změní na:

$$T_{out} = \frac{\dot{Q}}{S \cdot \alpha} + T_{\infty} , \quad (20)$$



kde

$$S = \pi \cdot D_{out} \cdot L \quad (21)$$



(Obr. 21: Označení veličin pro výpočet pláště kontejneru)

Pak výsledný vzorec pro výpočet vnější teploty kontejneru je:

$$T_{out} = \frac{\dot{Q}}{\pi \cdot D_{out} \cdot L \cdot \alpha} + T_{\infty} \quad (22)$$

**4.1.5 Odvození vztahu pro výpočet teploty ve stěně válce v závislosti na velikosti poloměru ( $r$ ) :**

Na vnějším povrchu válce platí podmínka přenosu teplené energie konvencí, tedy uplatňuje se (Fourierova) okrajová podmínka III. druhu, nebo-li tepelný tok vedením na povrchu tělesa o poloměru  $R$  je roven tepelnému toku konvekci:

$$-\lambda \cdot \frac{dT}{dr} \Big|_{r=R_{out}} = \alpha \cdot (T_{out} - T_{\infty}) \quad (23)$$

Derivací rovnice (6) pak vznikne přepis:

$$\frac{dT}{dr} = \frac{C_1}{r} \quad (24)$$

Po dosazení podmínky (23) do rovnice (24) vznikne tvar:

$$-\lambda \cdot \frac{C_1}{R_{out}} = \alpha \cdot (T_{out} - T_{\infty}) \quad (25)$$

$$C_1 = -\frac{R_{out} \cdot \alpha}{\lambda} \cdot (T_{out} - T_{\infty}) \quad (26)$$

Dosazením integrační konstanty  $C_1$  do rovnice (6) vznikne přepis:

$$T(r) = C_2 - \frac{R_{out} \cdot \alpha}{\lambda} \cdot (T_{out} - T_{\infty}) \cdot \ln r \quad (27)$$

Konstanta  $C_1$  se vyloučí z podmínky konstantní teploty  $T_{in}$  na vnitřním povrchu kontejneru  $r = R_{in}$ :

$$T_{in} = C_2 - \frac{R_{out} \cdot \alpha}{\lambda} \cdot (T_{out} - T_{\infty}) \cdot \ln R_{in} \quad (28)$$

$$C_2 = T_{in} + \frac{R_{out} \cdot \alpha}{\lambda} \cdot (T_{out} - T_{\infty}) \cdot \ln R_{in} \quad (29)$$

Po dosazení integrační konstanty  $C_2$  (29) do původní rovnice (27) vznikne tvar:

$$T(r) = T_{in} + \frac{R_{out} \cdot \alpha}{\lambda} \cdot (T_{out} - T_{\infty}) \cdot \ln R_{in} - \frac{R_{out} \cdot \alpha}{\lambda} \cdot (T_{out} - T_{\infty}) \cdot \ln r \quad (30)$$

po úpravě:

$$T(r) = T_{in} + \frac{R_{out} \cdot \alpha}{\lambda} \cdot (T_{out} - T_{\infty}) \cdot (\ln R_{in} - \ln r) \quad (31)$$

pro  $R_{in} \leq r \leq R_{out}$  pak platí:

$$T(r) = T_{in} + \frac{R_{out} \cdot \alpha}{\lambda} \cdot (T_{out} - T_{\infty}) \cdot \ln \frac{R_{in}}{r} \quad (32)$$

## 5. Volba modelové situace (kontejner, materiál, zbytkový výkon)

V praxi se, pro skladování vyhořelého paliva, používá celá řada různých kontejnerů. Každý typ kontejneru od jednotlivých výrobců je navržen pro skladování určitého typu paliva a určitého objemu za nějakých předem definovaných podmínek. Tudíž kontejnery se od sebe mohou v různých aspektech lišit a tím se liší i podmínky skladování v jednotlivých typech kontejnerů.

Pro konkrétní výpočet teplotního pole ve stěně, byl navržen kontejner válcovitého průřezu, který slouží pro skladování vyhořelého paliva v suchém meziskladu. Tento typ kontejneru a způsob skladování byl zvolen z důvodu, že se tato metoda skladování a podobný typ kontejneru využívá právě v České Republice.<sup>(1)</sup> Válcový kontejner byl zvolen proto, že stěna má konstantní tloušťku a tedy nedochází k navrstvení materiálu vlivem kolmosti stěn.

### Parametry kontejneru:

- povrch kontejneru je rovný, hladký, bez žebrování
- materiál tělesa kontejneru je izotropní
- výška:  $L = 4000\text{mm}$
- vnější průměr:  $D_{\text{out}} = 2600\text{mm}$
- vnitřní průměr:  $D_{\text{in}} = 1760\text{mm}$
- počet uskladněných kazet: 78 ks

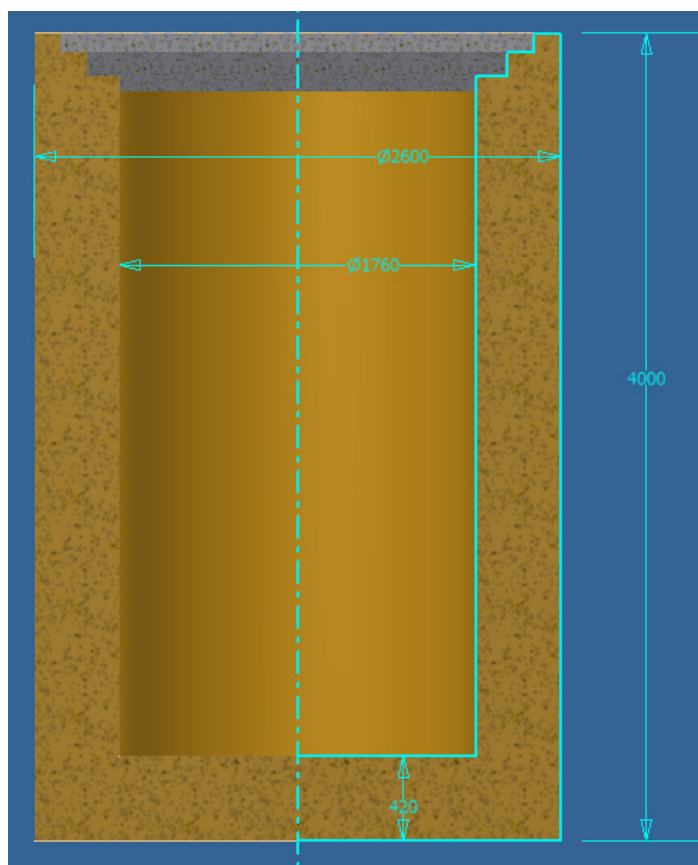
### Materiál kontejneru:

Litina s kuličkovým grafitem GGG40  
(ČSN 42 23 04, EN-GJS-400-8)

Tepelná vodivost materiálu:<sup>[8]</sup>  
 $\lambda = 36\text{W/mK}$

### Zbytkový výkon vyhořelých kazet:

$$P = 13560\text{ W}^{(2)}$$



(Obr.22: Geometrie navrženého kontejneru)

(1) v Jaderné Elektrárně Dukovany a plánuje se i pro Jadernou Elektrárnu Temelín

(2) hodnota zjištěna jako součet zbytkového výkonu jednotlivých kazet z tab.3

## 6. Analytický výpočtový model

Teplotní pole uvnitř kontejneru má prostorový charakter a nachází se v neizotropním prostředí, které je tvořeno soustavou materiálů s různými termofyzikálními vlastnostmi. Za těchto podmínek je analytické řešení nemožné, nebo příliš obtížné. Bude proto přikročeno k formulaci zjednodušujících předpokladů, jejichž účelem je umožnit analytické řešení teplotního pole ve stěně kontejneru. Toto teplotní pole se sice bude odchylvat od skutečného, avšak lze na druhou stranu odhadnout, jak bude skutečný výsledek ovlivněn.

### 6.1 Zjednodušující předpoklady pro výpočet

Pro výpočet teplotního pole daného kontejneru, jsou zavedeny tyto zjednodušující předpoklady:

- Vnitřní objemové zdroje tepla ve stěnách kontejneru jsou nulové
- Součinitel tepelné vodivosti kontejneru nezávisí na poloze
- Teplotní pole kontejneru je v čase neproměnné
- Objemový vývin tepla v palivových souborech je rovnoměrný – po výšce konstantní.
- Kontejner je zvenku ochlazován přirozeným prouděním vzduchu
- Pro zjednodušení analytického řešení rovnic přenosu tepla se předpokládá vedení tepla pouze ve směru kolmém k ose kontejneru (Přenos tepla v ose  $z$  je pokládán za nevýznamný). Diferenciální rovnice vedení tepla je pak závislá pouze na poloměru  $r$ .

Za těchto zjednodušujících podmínek se získá výpočtový model teplotního pole ve stěně kontejneru v prvním přiblížení. Nebude přesně odpovídat reálné hodnotě, ale nastíní přibližnou hodnotu teploty, která bude na vnitřní stěně kontejneru a vývin teplotního pole napříč stěnou.

Analytický výpočtový model teplotního pole vyvíjeného v kontejneru je zaměřen pouze na výpočet v oblasti stěny kontejneru a to z důvodu, že analytické vyjádření teplotního vývoje palivových článků v prostoru naráží na obtíže. Obtíže, které jsou způsobené nehomogenitou prostředí s různými materiály a tedy i s různými tepelnými vodivostmi ( $\lambda$ ) Proto jednoduchý popis průběhu teploty ( $T$ ) v prostoru palivových článků není možné vytvořit.

Jednou z možných variant by bylo nahradit nehomogenní prostředí tělesa jednou vhodně zvolenou fiktivní hodnotou tepelné vodivosti ( $\lambda$ ).

## **6.2 Formulace okrajových podmínek analytického výpočtového modelu**

### **1. Teplota okolí:**

Teplota okolí je zvolena na konstantní hodnotu:

$$T_{\infty} = 20^{\circ}\text{C}$$

### **2. Tepelná vodivost materiálu:**

Tepelná vodivost litiny s kuličkovým grafitem (GGG40) je: <sup>[8]</sup>

$$\lambda = 36 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

### **3. Odhad součinitele přestupu tepla na vnější stěně kontejneru:**

Velikost určující teploty:

$$T_f = \frac{1}{2} \cdot (T_{out} + T_{\infty})$$

$$T_f = \frac{1}{2} \cdot (60^{\circ}\text{C} + 20^{\circ}\text{C})$$

$$\underline{\underline{T_f = 40^{\circ}\text{C}}}$$

**Výpočet podmínky pro správnost vztah pro výpočet Nusseltova čísla (13) z kritériální rovnice o pro případ vertikální stěny o výšce L:**

Hodnoty zvolené pro výpočet:

$$T_{\infty} = 20^{\circ}C, T_{\text{out}} = 60^{\circ}C$$

$$\nu = 1,726 \cdot 10^{-5} \frac{m^2}{s} \text{ (pro } T_f = 40^{\circ}C) \text{ [16]}$$

$$\frac{D_{out}}{L} \geq \frac{35}{Gr_L^{1/4}}$$

$$\frac{D_{out}}{L} \geq \frac{35}{\left( \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot L^3}{\nu^2} \right)^{1/4}}$$

$$\frac{2,6m}{4m} \geq \frac{35}{\left( \frac{9,81ms^{-2} \cdot \frac{1}{313,15} K^{-1} \cdot 40K \cdot (4m)^3}{(1,726 \cdot 10^{-5} m^2 s^{-1})^2} \right)^{1/4}}$$

$$\underline{\underline{0,65 \geq 0,0486}}$$

Podmínka je splněna

**Výpočet Rayleighova čísla:**

$$Pr = 0,71 \text{ (pro } T_f = 40 \text{ °C)}^{[16]}$$

$$Ra = Pr \cdot Gr_L$$

$$Ra = 0,71 \cdot \frac{9,81 \text{ ms}^{-2} \cdot \frac{1}{313,15} \text{ K}^{-1} \cdot 40 \text{ K} \cdot (4 \text{ m})^3}{(1,726 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1})^2}$$

$$\underline{\underline{Ra = 1,91 \cdot 10^{11}}}$$

**Výpočet Nusseltova čísla (13) z kritériální rovnice pro případ vertikální stěny o výšce L:**

$$\overline{Nu}_L = \left\{ \frac{0,825 + 0,387 \cdot Ra_L^{1/6}}{[1 + (0,492 / Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2$$

$$\overline{Nu}_L = \left\{ \frac{0,825 + 0,387 \cdot (1,91 \cdot 10^{11})^{1/6}}{[1 + (0,492 / 0,71)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2$$

$$\underline{\underline{\overline{Nu}_L = 640,80}}$$



**Výpočet součinitele přestupu tepla, z rovnice (12):**

$$\lambda_v = 0,03003 \text{ W/mK (pro } T = 300 \text{ K)}^{[6]}$$

$$\alpha = \frac{\overline{Nu}_L \cdot \lambda_v}{L}$$

$$\alpha = \frac{640,80 \cdot 0,02624 \text{ W/mK}}{4m}$$

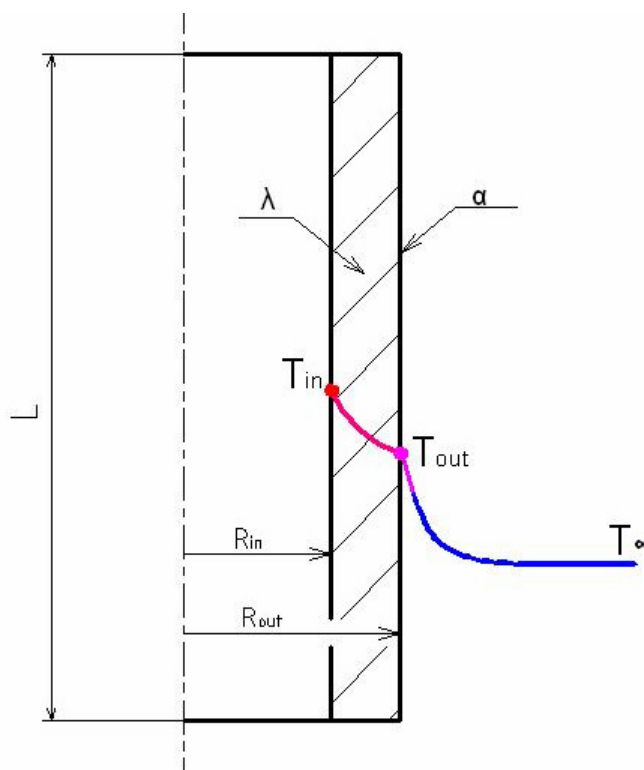
$$\underline{\underline{\alpha = 4,204 \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-1}}}$$

Z daných vstupních parametrů vychází hodnota součinitele přestupu tepla pro hladký povrch kontejneru velmi nízká, a proto teplota povrchu vychází okolo hodnoty 392 K (119°C), což je ve skutečnosti nereálná, příliš vysoká hodnota.

Přenos tepla ve stěně není avšak způsoben pouze konvekcí, která byla jako jediná uvažována ve výpočtu výše, ale i radiací, která hodnotu součinitele přestupu tepla zvýší. Také pokud budeme uvažovat, že povrch kontejneru nebude hladký, ale žebrovaný, pro lepší odvod tepla, dojde také ke zvýšení součinitele přestupu tepla.

Proto po konzultaci s vedoucím bakalářské práce, je součinitel přestupu tepla odhadnut na hodnotu  $12,5 \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-1}$ , která je blíže reálné hodnotě. Tedy pro další výpočty teplot bude za součinitel přestupu tepla použita právě hodnota  $12,5 \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-1}$ .

$$\alpha = 12,5 \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-1}$$

**6.3 Výpočet teploty ve stěně kontejneru pro vybrané podmínky**

(Obr. 23: Průběh teploty ve stěně kontejneru)

**Výpočet teploty  $T_{out}$  z rovnice (22):**

$$T_{out} = \frac{\dot{Q}}{\pi \cdot D_{out} \cdot L \cdot \alpha} + T_{\infty}$$

$$T_{out} = \frac{13560W}{\pi \cdot 2,6m \cdot 4m \cdot 12,5Wm^{-2}K^{-1}} + 20^{\circ}C$$

$$\underline{\underline{T_{out} = 53,2^{\circ}C}}$$

**Výpočet teploty vnitřní stěny kontejneru  $T_{in}$  z rovnice (32):**

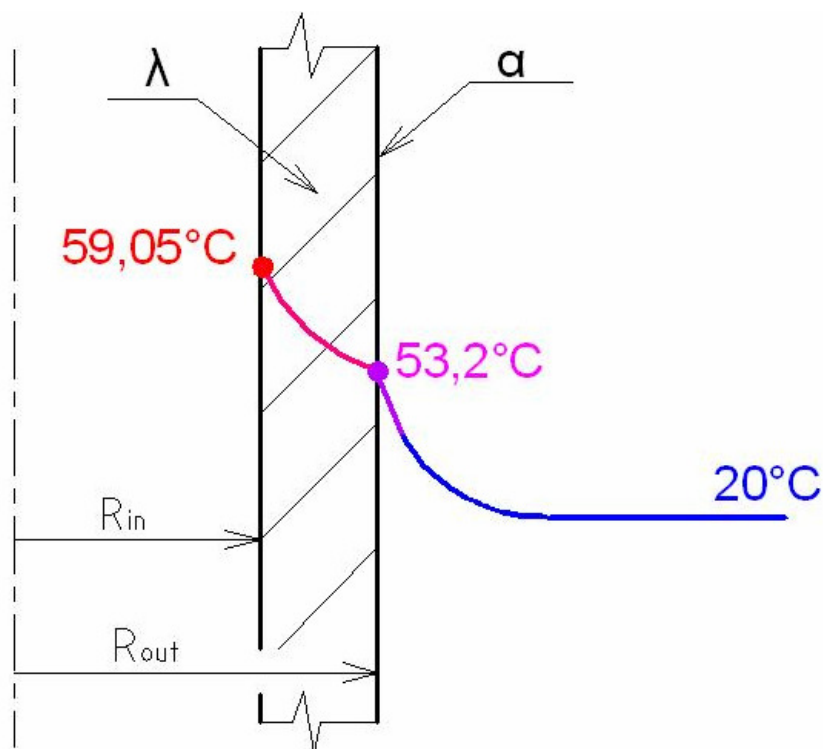
$$T(r) = T_{in} + \frac{R_{out} \cdot \alpha}{\lambda} \cdot (T_{out} - T_{\infty}) \cdot \ln \frac{R_{in}}{r}$$

$$T_{out} = T_{in} + \frac{R_{out} \cdot \alpha}{\lambda} \cdot (T_{out} - T_{\infty}) \cdot \ln \frac{R_{in}}{R_{out}}$$

$$T_{in} = T_{out} - \frac{R_{out} \cdot \alpha}{\lambda} \cdot (T_{out} - T_{\infty}) \cdot \ln \frac{R_{in}}{R_{out}}$$

$$T_{in} = 53,2^{\circ}\text{C} - \frac{1,3\text{m} \cdot 12,5\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}}{36\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}} \cdot (53,2^{\circ}\text{C} - 20^{\circ}\text{C}) \cdot \ln \frac{0,88\text{m}}{1,3\text{m}}$$

$$\underline{\underline{T_{in} = 59,05^{\circ}\text{C}}}$$



(Obr. 24: Průběhu vypočtených teplot ve stěně kontejneru)

## 7. Výpočtový model v systému ANSYS

### 7.1 Analýza teplotního pole ve stěně kontejneru na použité jaderné palivo:

$$\dot{Q} = 13560W$$

**Plocha přestupu tepla vnitřního povrchu kontejneru:**

$$S = \pi \cdot D_{in} \cdot L + 2 \cdot \frac{\pi \cdot D_{in}^2}{4} = \pi \cdot D_{in} \cdot \left(L + \frac{D_{in}}{2}\right)$$

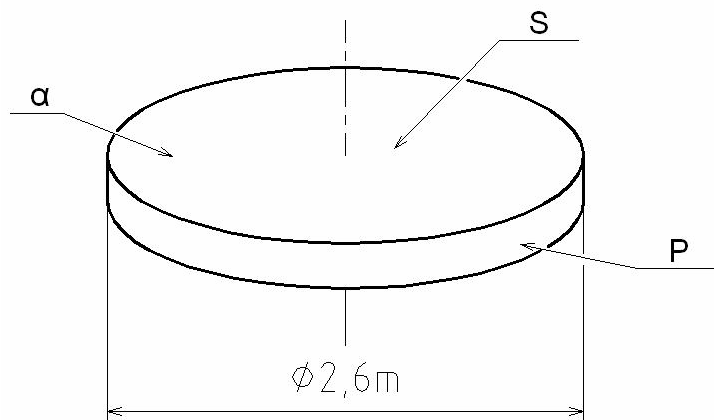
kde:  $D_{in} = 1,76 \text{ m}$   
 $L = 3,16 \text{ m}$

**Měrný tepelný tok stěnou:**

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{S} = \frac{\dot{Q}}{\pi \cdot D_{in} \cdot \left(L + \frac{D_{in}}{2}\right)}$$

$$\dot{q} = \frac{13560W}{\pi \cdot 1,76m \cdot \left(3,16m + \frac{1,76m}{2}\right)}$$

$$\dot{q} = 608,5 \frac{W}{m^2}$$

**Součinitel přestupu tepla na víko kontejneru:**

(Obr.25: Víko kontejneru)

Charakteristický rozměr:

$$L = \frac{S}{P} = \frac{\pi \cdot \frac{D_{out}^2}{4}}{\pi \cdot D_{out}} = \frac{1}{4} \cdot D_{out}$$

$$L = \frac{1}{4} \cdot 2,6m$$

$$\underline{\underline{L = 0,65m}}$$

Rayleighovo číslo:

$$Ra_L = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot L^3}{\nu^2} \cdot Pr$$

$$Ra_L = \frac{9,81ms^{-2} \cdot 3,193 \cdot 10^{-3} K^{-1} \cdot 40K \cdot (0,65m)^3}{(15,68 \cdot 10^{-6} m^2 s^{-1})^2} \cdot 0,71$$

$$\underline{\underline{Ra_L = 9,937 \cdot 10^8}}$$

Nusseltovo číslo:

$$\overline{Nu} = 0,15 \cdot Ra_L^{1/3}$$

$$\overline{Nu} = 0,15 \cdot (9,937 \cdot 10^8)^{1/3}$$

$$\underline{\underline{\overline{Nu} = 149,7}}$$

Součinitel přestupu tepla na víku kontejneru pak je:

$$\alpha_v = \frac{\overline{Nu} \cdot \lambda}{L_c}$$

$$\alpha_v = \frac{149,7 \cdot 0,02624}{0,65}$$

$$\underline{\underline{\alpha_v = 6 \frac{W}{m^2 K}}}$$

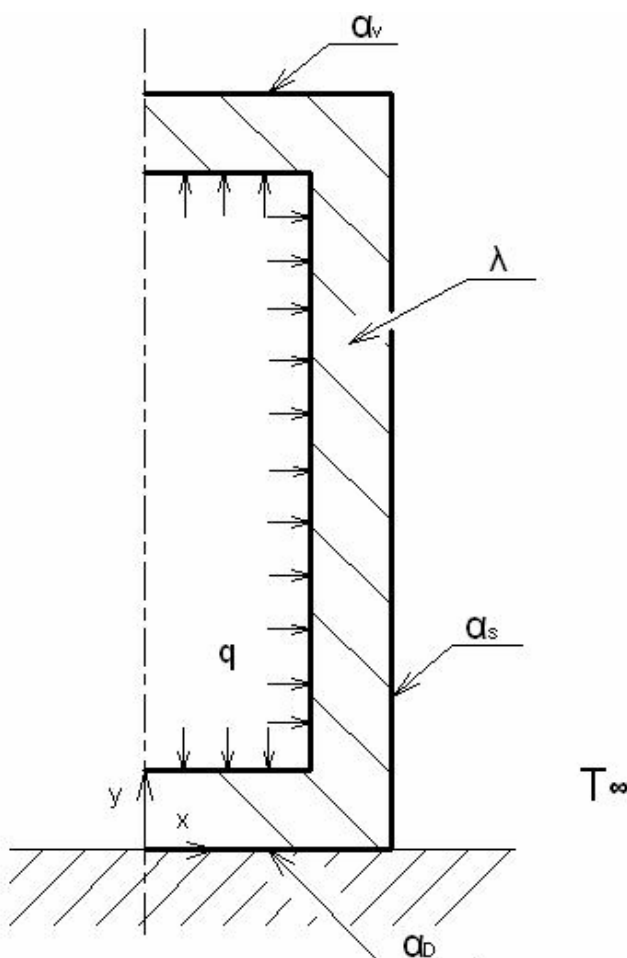
Po výšce kontejneru uvažována proměnlivá hodnota součinitele přestupu tepla:

$$\alpha = Y + 8 \text{ , tj. } \alpha = (8 \text{ až } 12) \frac{W}{m^2 K}$$

kde  $Y = (0 \text{ až } 4) \text{ m}$

**7.2 Jednotlivé varianty výpočtu:****Tabulka č.[2]: Varianty výpočtu:**

Varianta	$T_{\infty}$ [°C]	$\alpha_v$ [Wm <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> ]	$\alpha_D$ [Wm <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> ]	$\alpha_s$ [Wm <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> ]	$q$ [Wm <sup>-2</sup> ]	Radiace	Q (Konvekce / Radiace)
1	20	6	3	Y+8 (8 až 12)	608,5	není	13593 / 0
2	20	6	3	Y+8 (8 až 12)	608,5	ano	8950 / 4649
3	28	6	3	Y+8 (8 až 12)	608,5	ano	8723 / 4880

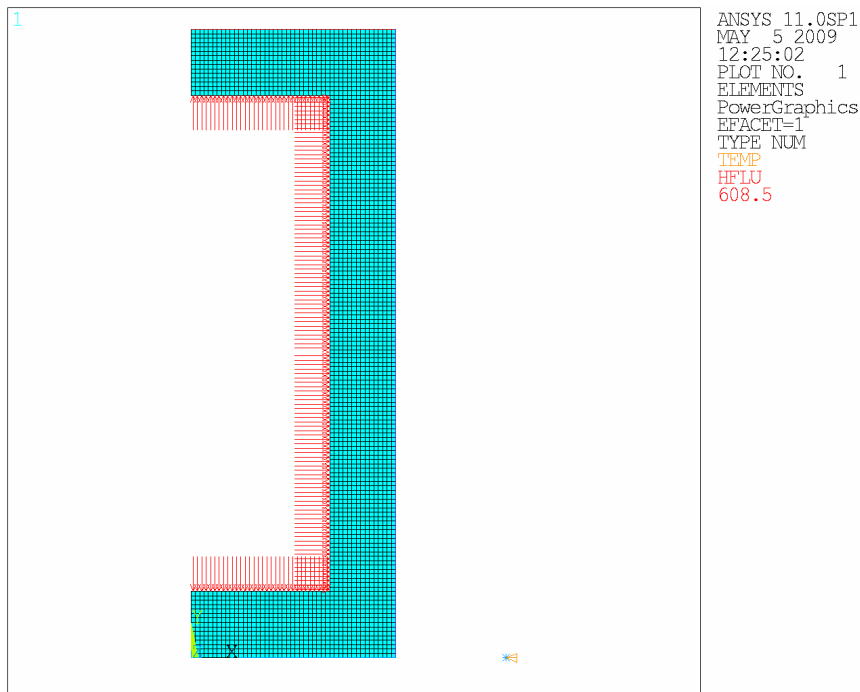


(Obr. 26: Označení součinitelů přestupu tepla)

**Rozložení tepelných toků v kontejneru:**

Tepelný tok vstupující do stěn, podstavy a víka je ve všech místech konstantní

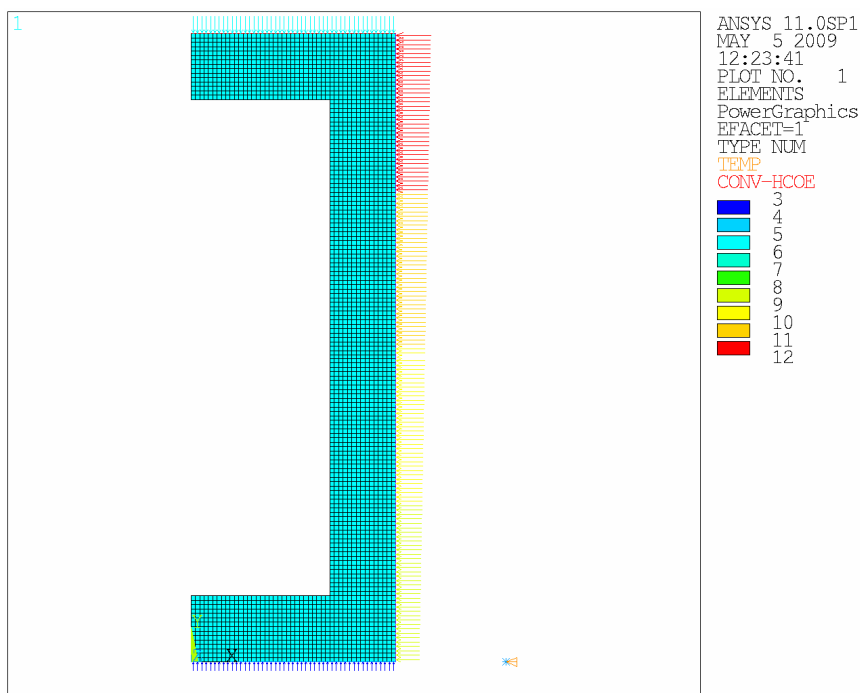
( $\dot{q} = 608,5 \text{ Wm}^{-2}$ )



(Obr.27: Rozložení tepelných toků v kontejneru)

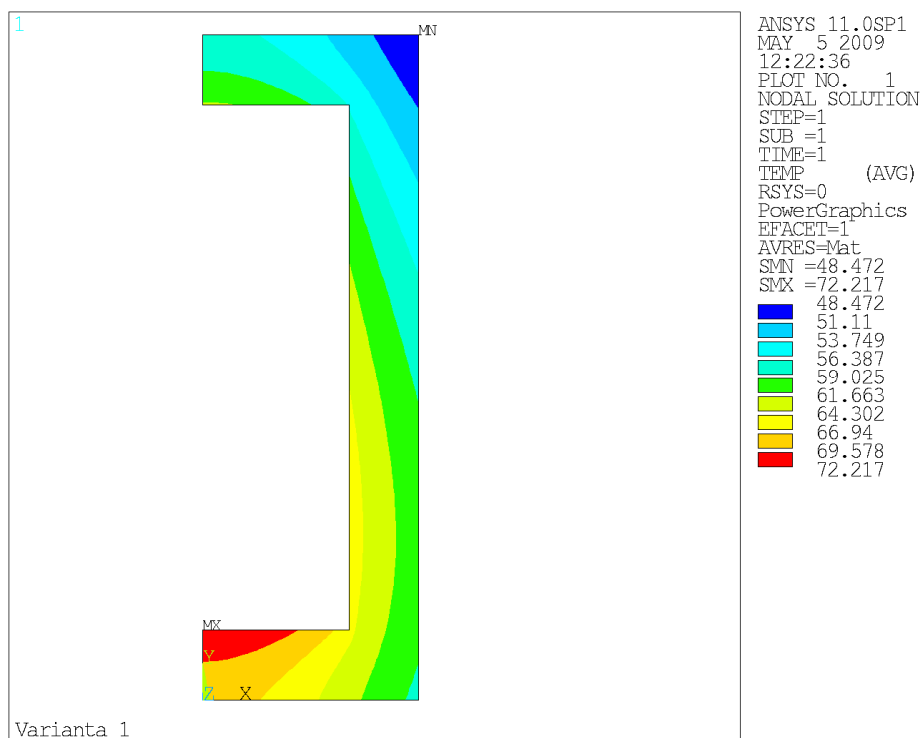
**Velikost součinitelů přestupu tepla na kontejneru:**

Velikost součinitele přestupu tepla je konstantní pro podstavu ( $\alpha_D$ ), víko ( $\alpha_V$ ) a má lineární průběh pro stěnu po výšce L ( $\alpha_S$ ).

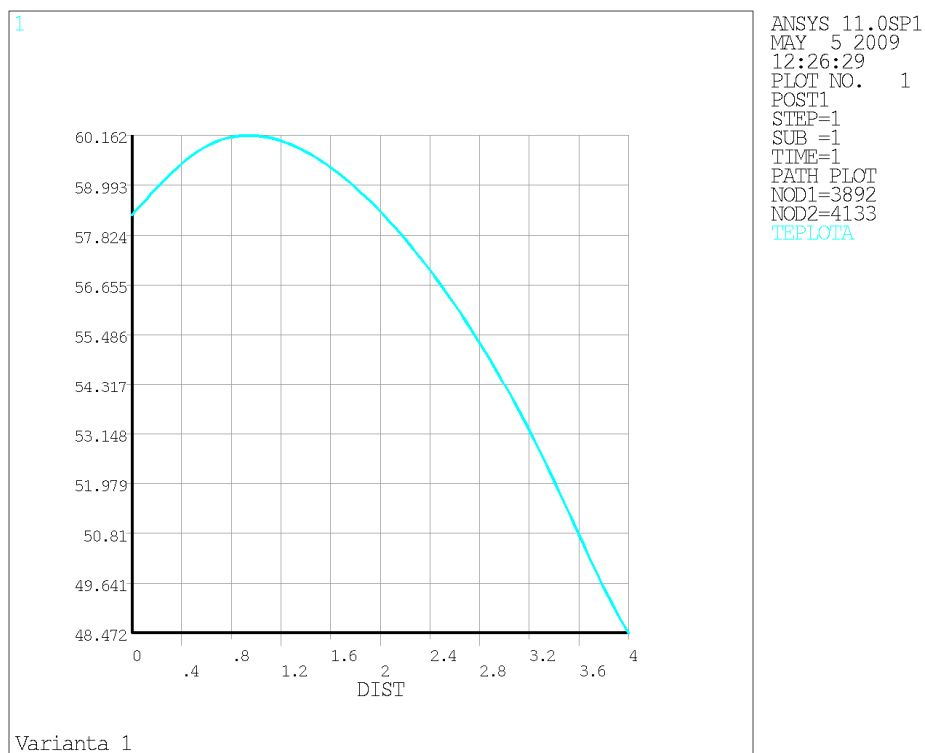


(Obr.28: Velikosti součinitelů přestupu tepla na kontejneru)

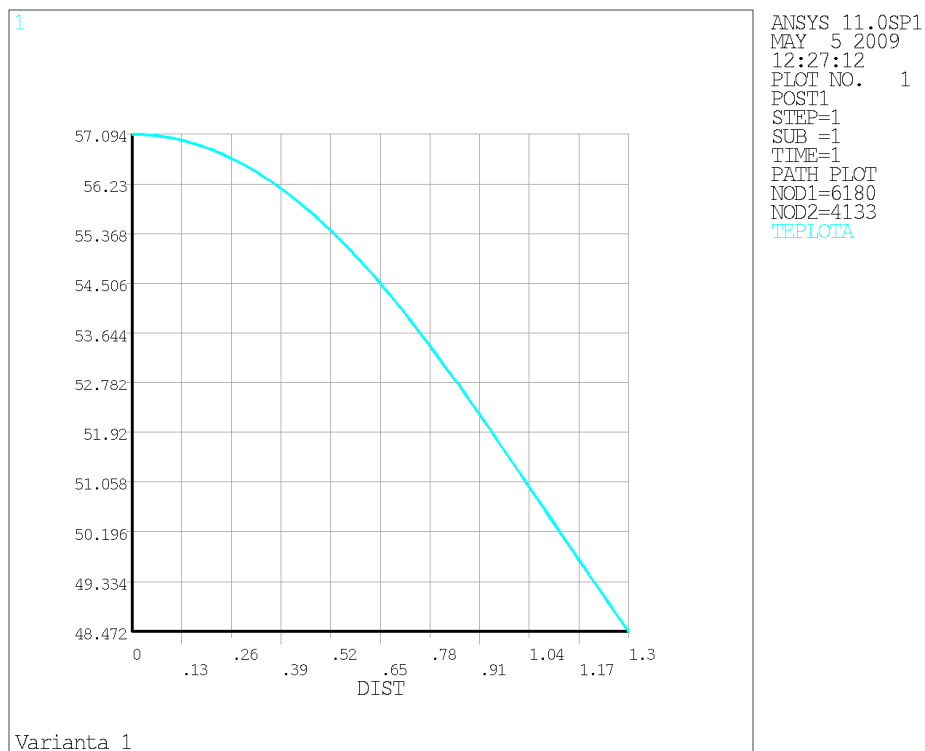
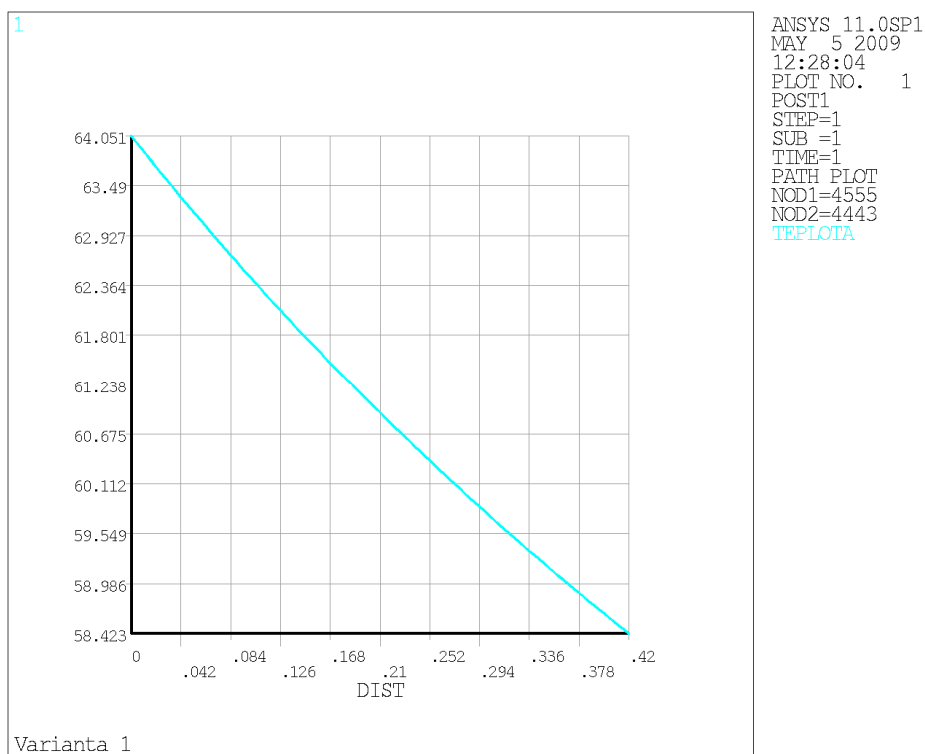


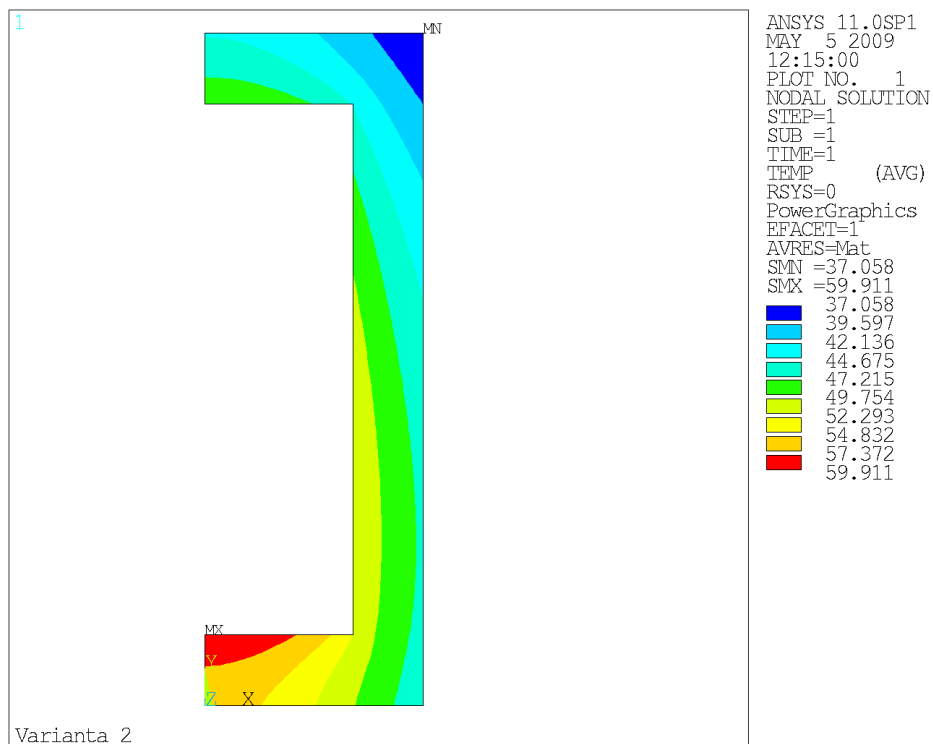
Varianta č.1: (bez radiace,  $T_{\infty} = 20\text{ °C}$ )

(Obr.29: Teplotní pole napříč kontejnerem)

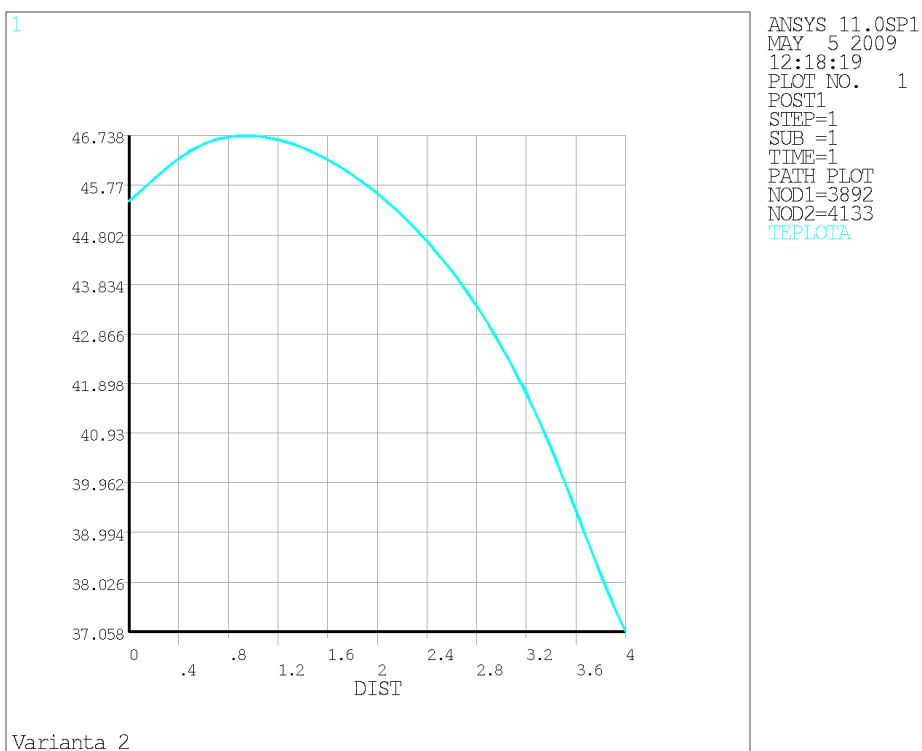


(Obr.30: Závislost teploty ve stěně na výšce kontejneru)

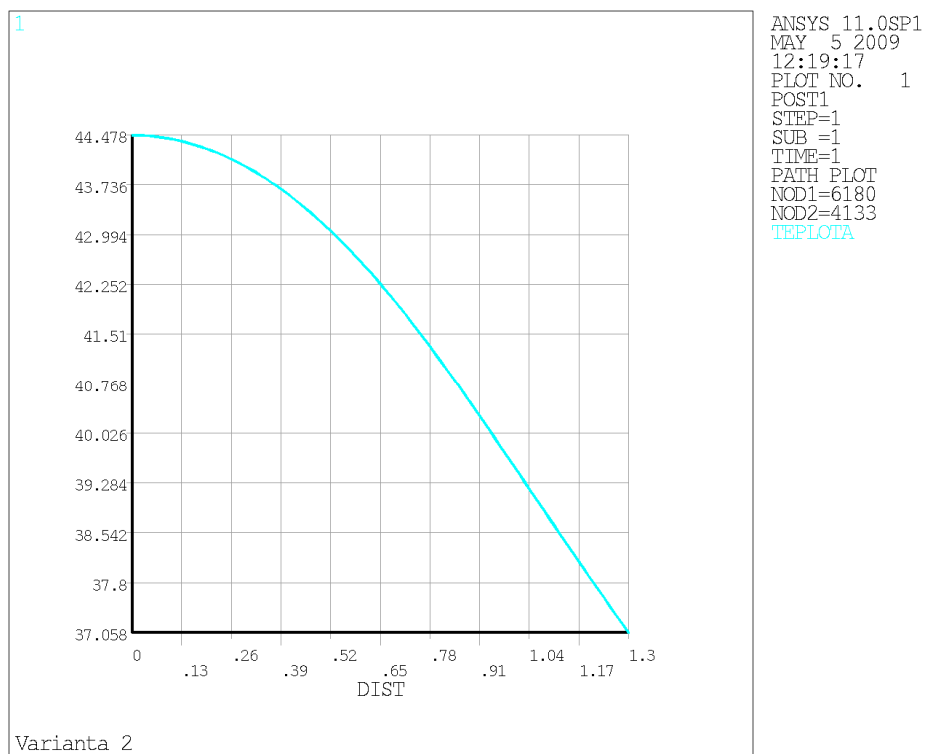
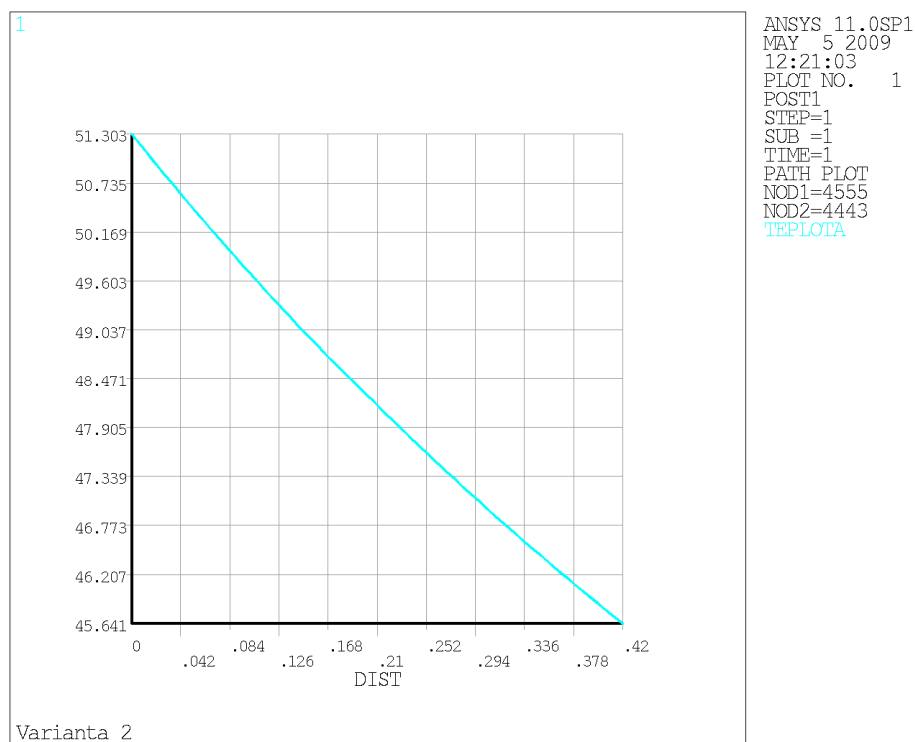
(Obr.31: Závislost teploty víka kontejneru na poloměru  $R_{out}$ )(Obr.32: Závislost teploty ve stěně na poloměru  $r$  ( $R_{in} \leq r \leq R_{out}$ ))

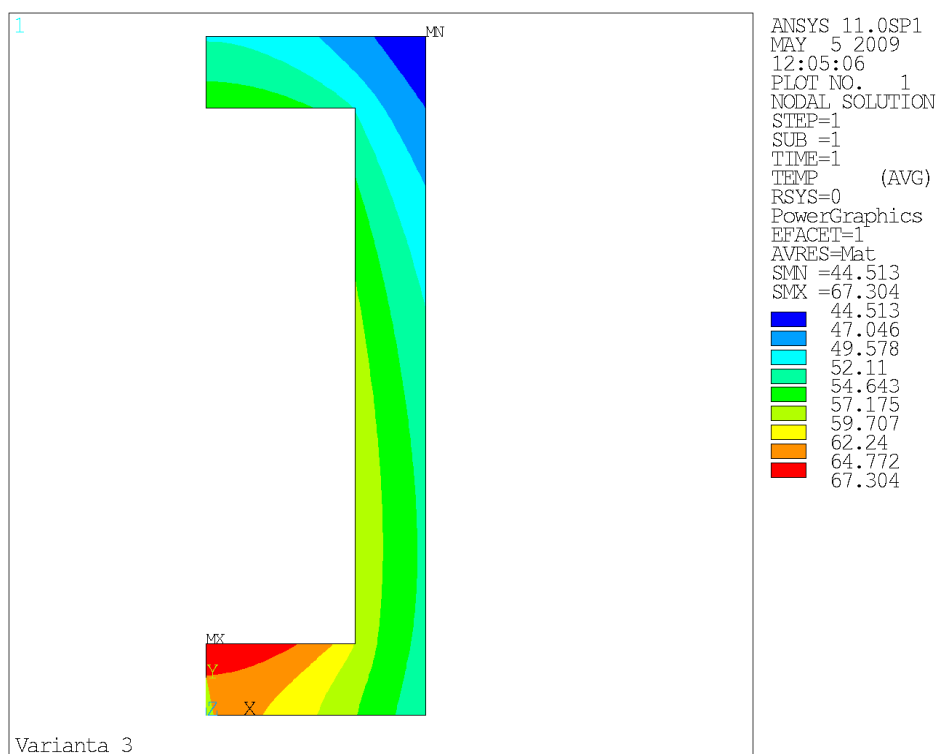
Varianta č.2: (s radiací,  $T_{\infty} = 20\text{ °C}$ )

(Obr.33: Teplotní pole napříč kontejnerem)

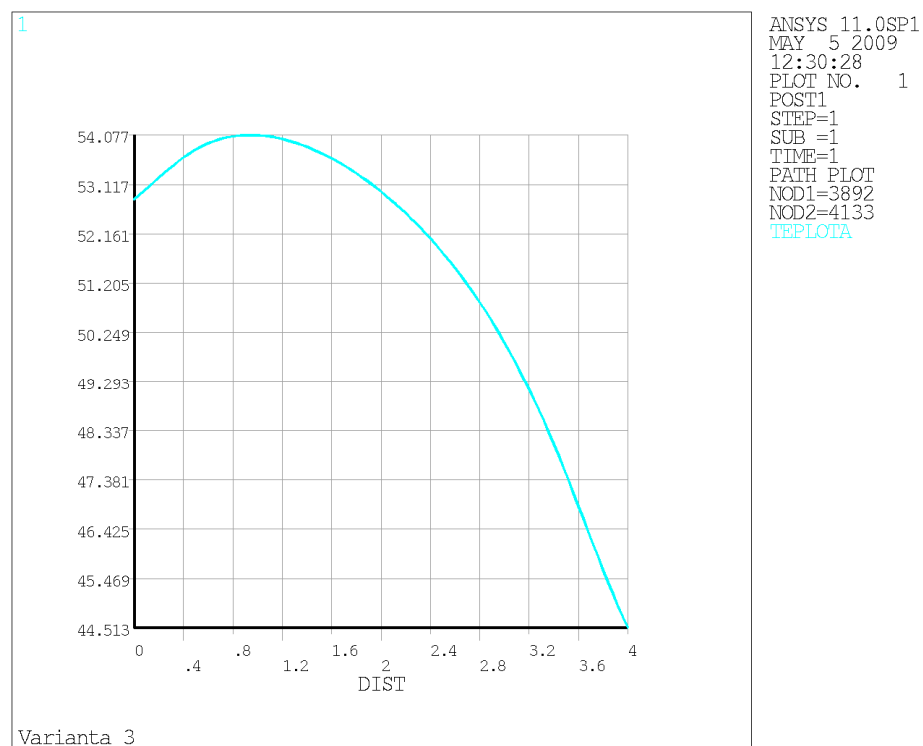


(Obr.34: Závislost teploty ve stěně na výšce kontejneru)

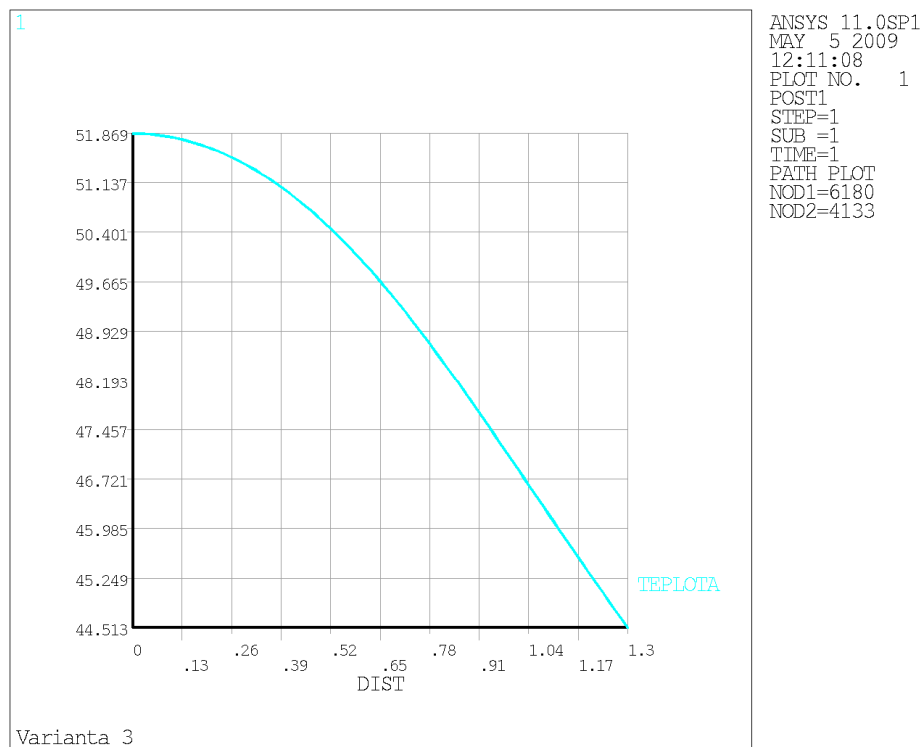
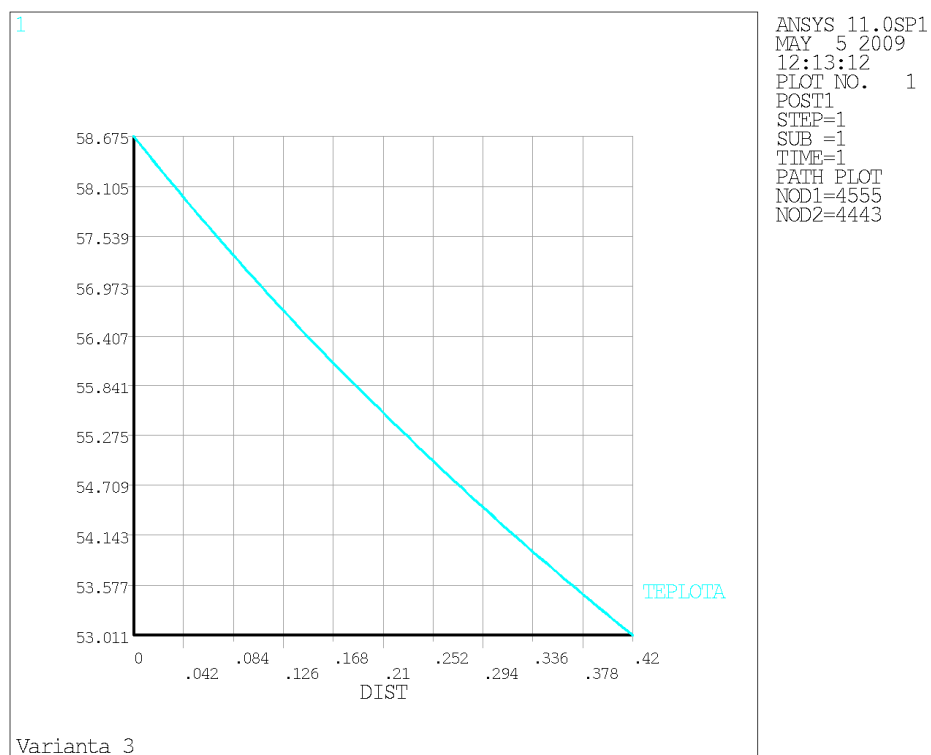
(Obr.35: Závislost teploty víka kontejneru na poloměru  $R_{out}$ )(Obr.36: Závislost teploty ve stěně na poloměru  $r$  ( $R_{in} \leq r \leq R_{out}$ ))

Varianta č.3: (s radiací,  $T_{\infty} = 28 \text{ }^{\circ}\text{C}$ )

(Obr.37: Teplotní pole napříč kontejnerem)



(Obr.38: Závislost teploty ve stěně na výšce kontejneru)

(Obr.39: Závislost teploty víka kontejneru na poloměru  $R_{out}$ )(Obr.40: Závislost teploty ve stěně na poloměru  $r$  ( $R_{in} \leq r \leq R_{out}$ ))

## 8. Závěr:

V této práci bylo pojednáno o způsobech nakládání s vyhořelým palivem, různými metodami skladování a ukázkami různých typů skladovacích kontejnerů. Primárním účelem této práce bylo sestavení teorie výpočtu teplotního pole navrženého kontejneru, včetně definování okrajových podmínek a zavedení zjednodušující parametrů pro výpočet, poté provedení analytického řešení teplotního pole a porovnání s numerickým modelem v systému ANSYS.

Výpočet teplotního pole byl proveden pro navržený válcový kontejner z litiny s kuličkovým grafitem o výšce 4 m, vnějším poloměru 1,3 m a tloušťce stěny 0,42 m, sloužící ke skladování 78 kazet s vyhořelým palivem v suchém meziskladu, kde je kontejner umístěn v poloze vertikální, ochlazován pouze přirozeným prouděním vzduchu.

Analytické řešení teplotního pole vycházelo z využití FDRVT v cylindrickém souřadném systému pro válcové těleso. S využitím definovaných zjednodušujících parametrů (viz. kap.6.1) a definováním okrajových podmínek (viz. kap.6.2), bylo možno vypočítat teplotu na povrchu kontejneru  $T_{\text{out}}$  a poté i teplotu na vnitřní stěně kontejneru  $T_{\text{in}}$ .

Tedy při zadané teplotě okolí  $T_{\infty} = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , zanedbání šíření tepla podstavou a víkem a uvažování, že veškeré teplo přenesené stěnou je odváděno do vzduchu volnou konvekcí (bez radiace), pak teplota povrchu kontejneru vychází na hodnotě  $T_{\text{out}} = 53,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$  a teplota na vnitřní stěně kontejneru  $T_{\text{in}} = 59,05 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Numerický výpočet v programu ANSYS byl proveden pro 3 různé varianty řešení. U všech tří variant byl tepelný tok vstupující do podstavu, víka a stěny ve všech místech konstantní. Velikost součinitele přestupu tepla byla, pro podstavu kontejneru, zvolena konstantní hodnota

$\alpha_D = 3 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ , pro víko kontejneru  $\alpha_V = 6 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$  a v případě stěny kontejneru je hodnota součinitele přestupu tepla dána vztahem  $\alpha_S = Y + 8$ , kde  $Y = (0 \text{ až } 4)\text{m}$ , tedy  $\alpha_S$  se pohybuje v intervalu  $(8 \text{ až } 12) \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ .

První varianta numerického řešení byla, taková, že při teplotě okolí  $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$  se přenesou celý tepelný výkon kazet pouze vedením (konvekcí). Pak teplota na povrchu kontejneru se v závislosti na výšce nacházela mezi teplotami  $(48,5 \text{ až } 60,2) \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Teplota na víku v závislosti na poloměru se pohybovala v intervalu  $57,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$  (pro  $r = 0$ ) až  $48,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$  (pro poloměr  $R_{\text{out}}$ ) a teplota napříč stěnou se pohybovala od  $T = 64,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$  (pro  $R_{\text{in}}$ ) až po  $T = 58,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$  (pro  $R_{\text{out}}$ ).

Druhá varianta byla taková, že při teplotě okolí  $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$  se přibližně 2/3 tepelného výkonu přenesou konvekcí a 1/3 výkonu radiací. Teplota na povrchu kontejneru se v závislosti na výšce poté pohybovala mezi teplotami  $(37 \text{ až } 46,7) \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Teplota na víku v závislosti na poloměru se nacházela v intervalu  $44,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$  (pro  $r = 0$ ) až  $37 \text{ }^{\circ}\text{C}$  (pro poloměr  $R_{\text{out}}$ ) a teplota napříč stěnou se pohybovala v rozmezí od  $T = 51,3 \text{ }^{\circ}\text{C}$  (pro  $R_{\text{in}}$ ) až po  $T = 45,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$  (pro  $R_{\text{out}}$ ).

Třetí varianta ukázala, že při teplotě okolí 28 °C se tepelný výkon konvekce ku radiaci přenese v poměru 2:1 (tedy 2/3 vedením, 1/3 radiací). Teplota na povrchu kontejneru se pak v závislosti na výšce pohybovala v intervalu teplot (44,5 až 54,1) °C. Teplota na víku v závislosti na poloměru se nacházela v rozmezí 51,9 °C (pro  $r = 0$ ) až 44,5 °C (pro poloměr  $R_{out}$ ) a teplota napříč stěnou se pohybovala od  $T = 58,7$  °C (pro  $R_{in}$ ) až po  $T = 53$  °C (pro  $R_{out}$ ).

Pokud porovnáme výsledek z analytického řešení teplot ( $T_{out}$ ,  $T_{in}$ ) s hodnotami ze tří variant z numerického řešení, je patrné, že nejbližší hodnotami je varianta č.3. A to i přesto, že v numerickém řešení je teplota okolí o 8 °C vyšší. Lze tedy říct, že analytické řešení je více konzervativní a to z důvodu, že přestup veškerého tepelného výkonu je uvažován pouze přes stěnu kde vedení tepla podstavou a víkem je zanedbáno a tím dochází ke zvýšení teploty na stěně kontejneru. Tedy hodnoty vypočítané analyticky, brát za pomyslně více skeptickou variantu, protože stejných hodnot teplot dosahuje kontejner podle reálnějšího numerického řešení až při zvýšení okolní teploty o 8 °C.

V případě porovnání výsledků řešení s první variantou, kde jsou shodné teplota okolí a zanedbání radiace, pak numerický výsledek teplot ( $T_{out}$ ,  $T_{in}$ ) vychází o něco přísnější, i když nezanedbává šíření tepla podstavou a víkem. To je způsobeno celkově nižší hodnotou součinitele přestupu tepla ( $\alpha_s$ ) na stěně kontejneru. Kde u analytického řešení je součinitel přestupu tepla roven po celé stěně hodnotě ( $\alpha = 12,5 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ ) a v případě analytického v intervalu (8 až 12)  $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ .

Hlavním přínosem této práce není přinést něco nového v oblasti výpočtu teplotního pole určitého typu kontejneru, protože údaje o teplotních polích jsou vždy zjišťovány dřív, než je kontejner uveden do provozu, ale možným přínosem může být nastínění problematiky výpočtu včetně zákonů a rovnic, které se zde uplatňují, pro někoho kdo není s touto problematikou příliš obeznámen a chtěl jí lépe porozumět. Také ukázat v jakých teplotních polích se kontejnery pro suchý mezisklad pohybují v závislosti na vstupních podmínkách.

Další částí možného řešení by mohl být pohled na vývoj teplotního pole uvnitř kontejneru. Kde by bylo potřeba opět stanovit zjednodušující parametry a okrajové podmínky, jako například velikost teploty na vnitřní stěně kontejneru a velikost tepelného toku na souřadnicích o poloměru  $R$ . Ale to už není součástí této práce.



## 9. Seznam obrázků a tabulek:

Číslo	Popis obrázku	Dostupné z:
Tabulka č[1]	Základní technické údaje OS Castor 440/84	
Tabulka č[2]	Varianty výpočtu	
Tabulka č[3]	Vlastností jednotlivých vyhořelých kazet	
Obrázek č.1:	Suchý mezisklad v Ahausu –Německo	
Obrázek č.2:	Centrální mokrý podzemní mezisklad CLAB – Švédsko	
Obrázek č.3:	Castor 440/84	[17]
Obrázek č.4:	Castor 440/84M	[19]
Obrázek č.5:	Castor HAW 20/28 CG	[17]
Obrázek č.6:	Castor THTR/AVR	[17]
Obrázek č.7:	Castor V/21	[17]
Obrázek č.8:	Koš Castoru V/21	[17]
Obrázek č.9:	Těleso Castoru GNS 16	[17]
Obrázek č.10:	Transport kontejneru VTUK	[17]
Obrázek č.11:	Constor RBMK 1500	[17]
Obrázek č.12:	Transport Constoru RBMK 1500	[17]
Obrázek č.13:	Kontejner TC1	[17]
Obrázek č.14:	Manipulace s košem kontejneru VPVR/M	[17]
Obrázek č.15:	Kontejner K1 x IRTM	[17]
Obrázek č.16:	Pohled na víko Kontejneru K1 x IRTM	[17]
Obrázek č.17:	Kontejner BOX-TYPE	[18]
Obrázek č.18:	Manipulace s kontejnerem MOSAIK	[18]
Obrázek č.19:	Označení souřadnic cylindrického systému	
Obrázek č.20:	Průběh teploty ve stěně s označením parametrů	
Obrázek č.21:	Označení veličin pro výpočet pláště kontejneru	
Obrázek č.22:	Geometrie navrženého kontejneru	
Obrázek č.23:	Průběh teploty ve stěně kontejneru	
Obrázek č.24:	Průběhu vypočtených teplot ve stěně kontejneru	
Obrázek č.25:	Víko kontejneru	
Obrázek č.26:	Označení součinitelů přestupu tepla	
Obrázek č.27:	Rozložení tepelných toků v kontejneru	
Obrázek č.28:	Velikosti součinitelů přestupu tepla na kontejneru	
Obrázek č.29:	Teplotní pole napříč kontejnerem	
Obrázek č.30:	Závislost teploty ve stěně na výšce kontejneru	
Obrázek č.31:	Závislost teploty víka kontejneru na poloměru $R_{out}$	

---

Obrázek č.32:	Závislost teploty ve stěně na poloměru $r$	
Obrázek č.33:	Teplotní pole napříč kontejnerem	
Obrázek č.34:	Závislost teploty ve stěně na výšce kontejneru	
Obrázek č.35:	Závislost teploty víka kontejneru na poloměru $R_{out}$	
Obrázek č.36:	Závislost teploty ve stěně na poloměru $r$	
Obrázek č.37:	Teplotní pole napříč kontejnerem	
Obrázek č.38:	Závislost teploty ve stěně na výšce kontejneru	
Obrázek č.39:	Závislost teploty víka kontejneru na poloměru $R_{out}$	
Obrázek č.40:	Závislost teploty ve stěně na poloměru $r$	

## 10. Seznam použité literatury:

- [1] RYTÍŘ, L. *Státy světa a jaderná energetika* [online]. c2009, [cit. 2009–4–1].  
< <http://proatom.luksoft.cz/jaderneelektrarny/staty/> >.
- [2] HONZÁK, František., et al. *Encyklopedie energie* [online]. c1998, poslední revize 12.4.2009 [cit. 2009 – 4 – 14]. <[http:// www.simopt.cz/energyweb/](http://www.simopt.cz/energyweb/) >.
- [3] ZDENĚČEK, D. Lokalita Rohozná [online]. 2008, [cit. 2009 – 4 – 9].  
< <http://dolnicerekev.cz/novy/index.php?page=lokalita-rohozna> >.
- [4] Hebert, H. Josef. “Nuclear waste won't be going to Nevada's Yucca Mountain, Obama official says.” *Chicago Tribune* [online]. March 6, 2009, [cit. 2009 – 4 – 14].  
< [http://www.chicagotribune.com/news/nationworld/chi-nuke-yucca\\_frimar06,0,2557502.story](http://www.chicagotribune.com/news/nationworld/chi-nuke-yucca_frimar06,0,2557502.story) >.
- [5] HEŘMANSKÝ, B. *Termomechanika jaderných reaktorů*. 1.vyd. Praha: Academia, 1986. 436 s. ISBN 21 – 087 – 86.
- [6] JÍCHA, M. *Přenos tepla a látky*. Brno: Akademické nakladatelství Cerm, 2001. 160 s. ISBN 80 – 214 – 2029 – 4.
- [7] KREITH, F.–BOHN, M. S. *Principles of Heat Transfer*. Sixth edition, Brooks/Cole, ISBN 0 – 534 – 37596 – 0
- [8] kolektiv autorů, *Lexikon technických materiálů*, Verlag Dashöfer, vydáno říjen 2002, ISBN 80 – 86229 – 02 – 5.
- [9] MAREK, J. *Jaderná energie*. Čez, 2000. 72 s.
- [10] ŠVAŘÍČEK, T. *Skladování radioaktivního odpadu*. Třebíč, 2006. 60 s. Maturitní práce na SPŠT a SOUT Třebíč. Vedoucí maturitní práce Zuzana Bobková.
- [11] *Nový sklad použitého jaderného paliva*. Pro Engineering , 2001. 7 s.
- [12] Centrum experimentální geotechniky fakulty stavební ČVUT Praha. *Problematika ukládání odpadů v ČR* [online]. c2002, poslední revize 19.9.2006 [cit. 2009 – 4 – 1].  
< [http://ceg.fsv.cvut.cz/CZ/ceg-uvod/02\\_ukladani.htm](http://ceg.fsv.cvut.cz/CZ/ceg-uvod/02_ukladani.htm) >.
- [13] OTČENÁŠEK, P. Odpady z palivového cyklu jaderných elektráren. *Vesmír* [online]. září 2005, roč. 4, č. 84 [cit. 2009 – 3 – 29]. Dostupné z  
<<http://www.vesmir.cz/clanek.php3?stranka=536&cislo=9&rok=2005&pismo=>>>.  
ISSN 1214 – 4029
- [14] ŠRÁMKOVÁ, L. *Jaderná energetika a my*. Brno, 2007. 100 s. Diplomová práce na Přírodovědecké fakultě Masarykovy Univerzity. Vedoucí diplomové práce RNDr. Aleš Mareček, CSc.

[15] *Divergence* [online]. 11.4.2006, poslední revize 14.3.2009 [cit. 2009–3–14]. Dostupné z: < <http://cs.wikipedia.org/wiki/Divergence>>.

[16] *Hodnoty vody a vzduchu pro výpočet přestupu tepla* [online]. poslední revize 2.5.2009 [cit. 2009–5–4]. Dostupné z:< <http://www.tzb-info.cz/t.py?i=55&h=38&obor=1&t=16>>.

[17] ŠKODA-JS. *Kontejnery Škoda Plzeň* [pdf dokument]. [cit. 2009–3–5]. Dostupné z: < [http:// http://www.skoda-js.cz/Knihovna/Prezentace\\_cz.html](http://http://www.skoda-js.cz/Knihovna/Prezentace_cz.html) >.

[18] GEISER,H. *Management of Operational and Decommissioning Radioactive Waste Resulting from Nuclear Power Plants in Germany*. Würzburg, 2008. 40 s.

[19] Státní úřad pro jadernou bezpečnost *Zkušební provoz skladu vyhořelého paliva Dukovany*. [online]. [cit. 2009–5–4]. Dostupné z:< [http://www.sujb.cz/?c\\_id=714](http://www.sujb.cz/?c_id=714) >.

## 11. Příloha

**Tabulka č.[3]: Vlastností jednotlivých vyhořelých kazet:**

Poč. obohacení	Vyhoření	Zbytkový výkon
[%U235]	[MWd/tU]	[W]
3,60	43000	195
3,60	43000	195
3,60	43000	195
3,60	43000	195
3,60	43000	195
3,60	43000	195
3,60	43000	195
3,60	43000	195
3,60	42850	195
3,60	42850	195
3,60	42850	195
3,60	42850	195
3,60	42850	195
3,60	42850	195
3,60	42850	195
3,60	42850	195
3,60	42700	192
3,60	42700	192
3,60	42700	192
3,60	42700	192
3,60	42700	192
3,60	42700	192
3,60	41500	186
3,60	41500	186
3,60	41500	186
3,60	41500	186
3,60	41500	186
3,60	41500	186
3,60	41500	186
3,60	41150	185
3,60	41150	185
3,60	41150	185
3,60	41150	185
3,60	41150	185
3,60	41150	185
3,60	41150	185
3,60	40900	190
3,60	40900	190
3,60	40900	190
3,60	40900	190
3,60	40900	190
3,60	40900	190
3,60	40250	187
3,60	40250	187
3,60	40250	187

3,60	40250	187
3,60	40250	187
3,60	40250	187
3,60	40050	170
3,60	40050	170
3,60	40050	170
3,60	40050	170
3,60	40050	170
3,60	40050	170
3,60	40050	170
3,60	40050	170
3,60	40050	170
3,60	40050	170
3,60	38900	175
3,60	38900	175
3,60	36600	155
3,60	36600	155
3,60	36500	165
3,60	36500	165
3,60	36500	165
3,60	36500	165
3,60	36500	165
3,60	36500	165
3,60	36500	165
3,60	36250	165
3,60	36250	165
3,60	36250	165
3,60	36250	165
3,60	36250	165
3,60	36250	165
3,60	36250	165
3,60	33300	140
3,60	33300	140
3,60	33300	140
3,60	33300	140
3,60	33300	140
3,60	33300	140
3,60	33300	140
3,60	33000	135
3,60	31250	130
3,60	31250	130
3,60	31250	130
3,60	31250	130
3,60	31250	130
3,60	29800	120